

## Resum

“Disseny d'un *hydrofoil* per a una embarcació esportiva AC45” és un projecte on es duu a terme, dins del camp de la mecànica de fluids, un estudi teòric i experimental dels *hydrofoils* per tal de poder realitzar un bon disseny d'aquest en unes condicions concretes.

En aquest s'explicarà en que consisteix l'actuació d'aquestes ales hidrodinàmiques en embarcacions de competició i com aquestes permeten atènyer condicions de navegació d'alta velocitat.

Mitjançant el software Visualfoil 5.0 s'anirà explicant en un primer anàlisi 2D, l'estudi dels diferents perfils d'ala emprats en aquest tipus de pràctica i com aquests afecten al rendiment hidrodinàmic. S'analitzaran en diferents perfils d'ala els coeficients de sustentació i resistència a l'avanç, segons l'angle d'atac amb el que incideixen i tenint en compte les condicions que es donen en les embarcacions AC45.

Finalment un cop completat el disseny en 2D, es realitzarà un estudi hidrodinàmic en 2D mitjançant el software ANSYS Fluent 15.0. En aquesta part s'analitzarà el comportament dels *hydrofoils* en termes d'estabilitat, sustentació, resistència a l'avanç per tal de provar la seva eficiència hidrodinàmica.

Una vegada finalitzat l'estudi del perfil en 2D es realitzarà un disseny del perfil en 3D i s'analitzarà les corrents que genera a la punta del perfil.

Finalment es presentarà un disseny del *hydrofoil* complet.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>5</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.2. Origen del projecte i motivació .....	9
2.3. Requeriments previs .....	9
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>11</b>
3.1. Objectius del projecte .....	11
3.2. Abast del projecte .....	11
<b>4. PERFILS HIDRODINÀMICS</b>	<b>13</b>
4.1. Introducció al <i>hydrofoil</i> .....	13
4.1.1. Que és un <i>hydrofoil</i> ? .....	13
4.1.2. Que és un AC45? .....	15
4.2. Geometria i paràmetres del perfil .....	16
4.3. Principis i fenòmens fluidodinàmics .....	18
4.3.1. Forces de sustentació .....	19
4.3.2. Forces de resistència a l'avanç .....	21
4.3.3. Moment de capcineig .....	24
4.3.4. Entrada en pèrdua .....	25
4.3.5. Cavitació .....	26
4.3.6. Força de resistència a l'avanç induïda .....	28
4.4. Selecció del perfil .....	29
4.4.1. Criteris de selecció .....	29
4.4.2. Anàlisi dels perfils .....	31
4.4.3. Comparativa dels perfils .....	52
4.4.4. Selecció perfil òptim .....	58
<b>5. SIMULACIÓ CFD</b>	<b>61</b>
5.1. Que és el CFD? .....	61
5.2. Desenvolupament de la simulació en 2D .....	61
5.2.1. Plantejament del problema .....	61
5.2.2. Generació de la geometria 2D. ....	62
5.2.3. Obtenció de la malla .....	63
5.3. Introducció de les condicions .....	64

5.4.	Anàlisi i interpretació de les solucions 2D.....	65
5.4.1.	Anàlisi de les línies de corrent.....	66
5.4.2.	Anàlisi de les velocitats .....	67
5.4.3.	Anàlisi de les pressions.....	70
5.4.4.	Estudi de la cavitació .....	74
5.4.5.	Anàlisi de la turbulència .....	75
5.5.	Disseny i anàlisi del 3D.....	76
5.5.1.	Tija del <i>hydrofoil</i> .....	76
5.5.2.	Punta del <i>hydrofoil</i> .....	78
5.5.3.	Model en 3D .....	83
<b>6.</b>	<b>PRESSUPOST I PLANIFICACIÓ .....</b>	<b>87</b>
6.1.	Pressupost de personal .....	87
6.2.	Pressupost de serveis.....	88
6.3.	Pressupost de material d'oficina .....	89
6.4.	Pressupost total del projecte.....	90
6.5.	Diagrama Gantt.....	91
<b>7.</b>	<b>IMPACTE MEDI-AMBIENTAL .....</b>	<b>93</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>95</b>

# 1. Glossari

SIGLES/ABREVIACIONS	DESCRIPCIÓ
PFC	Projecte final de carrera
2D	Dos dimensions
3D	Tres dimensions
CFD	Computacional Fluid Dynamics
AC72	America's Cup boat class 72
AC45	America's Cup boat class 45
E817	Eppler 817
E818	Eppler 818
E836	Eppler 836
E837	Eppler 837
E838	Eppler 838
E874	Eppler 874
E904	Eppler 904
E908	Eppler 908
AOA	Angle of Attack
UIUC	University of Illinois at Urbana-Champaign

SIMBOLS	DESCRIPCIONS	UNITATS
$\alpha$	Angle d'atac	°
$u_{\infty}$	Velocitat del fluid a l'entrada del sistema	m/s
$u$	Velocitat en un punt	m/s
$L$	Força de sustentació (Lift)	N
$D$	Força de resistència a l'avanç (Drag)	N
$M$	Moment de capcineig	N·m
$c$	Corda del perfil	m
$C_p$	Coeficient de pressió	--
$W$	Pes total de l'embarcació	N
$\rho$	Densitat	Kg/m <sup>3</sup>
$A_L$	Àrea del perfil	m <sup>2</sup>
$A_p$	Àrea del perfil en planta	m <sup>2</sup>
$C_L$	Coeficient de sustentació	--
$C_D$	Coeficient de resistència a l'avanç	--
$C_M$	Coeficient de capcineig	--
$\beta$	Rendiment hidrodinàmic	--
$\lambda$	Pes de l'embarcació en tant per u	--
$m$	Massa	Kg
$g$	Gravetat	m/s <sup>2</sup>

$\mu$	Viscositat dinàmica del fluid	Pa·s
$P_{ABS}$	Pressió absoluta	Pa
$P_{ATM}$	Pressió atmosfèrica	Pa
$P_{REL}$	Pressió relativa	Pa
$P_D$	Pressió dinàmica	Pa
$P_s$	Pressió estàtica	Pa





## 2. Prefaci

### 2.2. Origen del projecte i motivació

Al llarg de la carrera d'enginyeria ens hem dedicat a intensificar els nostres coneixements en el disseny industrial. Tanmateix els conceptes que emmarquen la ciència de la mecànica de fluids sempre ens han atret, fet que també ens ha portat realitzar assignatures optatives d'aquesta especialització.

Fa un any vam matricular-nos de l'assignatura optativa Aerodinàmica, en la qual vem participar en diferents anàlisis i estudis aerodinàmics. La realització del disseny per tal d'aconseguir un rendiment aerodinàmic òptim ens va semblar que era una connexió entre disseny i enginyeria molt atractiva.

El tema del projecte, va ser proposat per el professor Enric Trillas. Quan vam informar-nos sobre el món que envoltava aquestes "ales aquàtiques" ens va semblar força desafiant haver de reunir totes les nostres capacitats enginyerils per arribar a torbar una solució eficient i poder finalment dissenyar-la.

En un principi el projecte proposat per el professor Enric Trillas donava abast a un estudi dels *hydrofoils* i les seves aplicacions en el món de la nàutica, però el que realment ens atreia era adaptar l'estudi a un cas concret. Poder fer un estudi i anàlisi en 3D del disseny realitzat fins aconseguir un *hydrofoil* eficient.

### 2.3. Requeriments previs

Gràcies als coneixements teòrics de Mecànica de Fluids i Aerodinàmica adquirits al llarg de la carrera, ha sigut possible encarar aquest projecte. L'adquisició de conceptes com sustentació, resistència a l'avanç, entrada en pèrdua, capa límit, distribució de pressions, cavitació i més, ens ha permès poder aprofundir en l'estudi hidrodinàmic dels *hydrofoils*.

Per altra banda, a nivell de software, hi ha hagut cursos que ens han permès poder realitzar tots els anàlisis experimentals de manera més fluida. En la part del disseny, un curs realitzat a l'Escola ens ha ajudat en el desenvolupament de superfícies sustentadores amb el programa CATIA V5, d'aquesta manera obtenint un disseny en 3D. L'assignatura d'Aerodinàmica ens va introduir en el programa ANSYS Fluent utilitzat en l'anàlisi de les peces en 2D i 3D.



## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

“Disseny d'un *hydrofoil* per a una embarcació esportiva AC45 “ és un projecte de fi de carrera que pretén ajudar a assolir els següents objectius:

- Aprofundir en el coneixement dels *hydrofoils* i els diferents tipus existents segons el tipus de navegació desitjada.
- Prendre coneixement sobre quins són els paràmetres i dades analítiques que permeten una selecció del perfil amb més eficiència per les especificacions requerides.
- Aprendre a realitzar analítiques fluidodinàmiques en 2D gràcies al software VisualFoil 5.0.
- Trobar, dintre de la base de Dades Internacional de perfils d'ala (UIUC Airfoil Data Site), el perfil d'ala més eficient per la navegació d'un catamarà AC45.
- Realitzar un estudi analític mitjançant un software de simulació fluidodinàmica computacional, saber gestionar, comparar i avaluar la informació obtinguda.
- Realitzar un disseny 2D i 3D amb alta eficiència hidrodinàmica i amb capacitat sustentadora per enlairar una embarcació AC45.

### 3.2. Abast del projecte

En aquest projecte, en una primera part es tractarà d'introduir de manera teòrica que són els *hydrofoils* i quins són els conceptes que contribueixen al seu funcionament. Cal dir que es tracta d'un projecte de disseny i simulació per el que no s'entrarà en profunditat en termes conceptuals teòrics tals que la circulació en un perfil (Teorema de Kutta-Yukovski) o teories del flux potencial.

Un cop introduïts els *hydrofoils*, es farà un anàlisi de quin és el perfil d'ala més adient per aquest tipus d'embarcació. Aquest estudi es limitarà als perfils catalogats en el registre de dades (UIUC Airfoil Data Site), és a dir no es modificarà manualment cap coordenada dels perfils. S'agafaran només els perfils catalogats com específics per *hydrofoils*. En aquest estudi en 2D es farà un estudi sobre la cavitació generada amb el ANSYSFluent degut a la absència d'aquest tipus de gràfic en el software del VisualFoil 5.0.



## 4. Perfils hidrodinàmics

### 4.1. Introducció al *hydrofoil*

#### 4.1.1. Que és un *hydrofoil*?

L'*hydrofoil* o hidroala és una superfície sustentadora. Es tracta d'una superfície amb perfil d'ala que treballa en medi aquàtic. Aquestes superfícies es caracteritzen per el seu perfil hidrodinàmic. Aquests perfils actuen seguint el mateix principi que l'ala d'un avió. Aquesta superfície sustentadora submergida en medi aquàtic permet elevar, en condicions determinades, l'embarcació per tal de reduir la fricció del casc de l'embarcació amb l'aigua. Això permet atènyer velocitats més elevades i reduir el capcineig generat per les ones aportant més estabilitat.

Aquesta superfície sustentadora permet augmentar les prestacions de les embarcacions. En el cas d'embarcacions motoritzades permet reduir l'energia necessària per atènyer les mateixes velocitats i permet una navegació i maniobrabilitat més estable. Aquests sistemes d'*hydrofoils* s'utilitzen en gran part en embarcacions d'ús militar (Fig.4.1) i embarcacions per a transport de passatgers (Fig. 4.2.).



Fig. 4.1. Embarcació militar incorporant sistema d'*hydrofoils*



Fig. 4. 2. Embarcació de passatgers amb sistema d'*hydrofoils*

En el cas d'aquest projecte es tracta d'un sistema d'*hydrofoils* per a embarcacions no motoritzades, concretament impulsades per el vent (Fig. 4.3.). Això fa que les condicions de l'entorn marquin l'ús d'aquestes ales sustentadores i les característiques de l'embarcació marqui el disseny d'aquestes.



Fig. 4. 3. Tri-marà Hydroptère

#### 4.1.2. Que és un AC45?

L' AC45 és una embarcació esportiva nàutica, es caracteritza per ser un catamarà de 45 peus d' eslora.

Aquest catamarà va esser dissenyat especialment com a versió reduïda del catamarà AC72. Els més de 45 nusos que es pot atènyer amb el AC72 i la inestabilitat de l'embarcació reduïen molt la seguretat dels tripulants, fins que al 2013 en un entrenament un accident es va cobrar la vida d'un tripulant. És per aquesta raó i degut a la poca experiència i desconeixement de la navegació amb *hydrofoils* per embarcacions tant rapides com l' AC72, que s'ha incrementat la utilització dels AC45 (Fig.4.4.) per tal de guanyar experiència en aquest tipus de regata. Les properes America's World Cup Series es realitzaran amb els AC45 per tal d'aprofundir en els coneixements de navegació dels AC72 que s'utilitzaran en el 2018.

També és característic el sistema d'hidroales que incorpora als seus dos cascos. Aquest sistema d'hidroales es compon de dos hidroales retràctils, "daggerboards", situades als cascos aproximadament a l'altura del pal per poder mantenir el màxim equilibri. Per altra banda aquestes embarcacions també disposen a la part de popa unes quilles "rudders" que a vegades disposen a la part inferior d'una superfície alar per tal d'aportar estabilitat i sustentació, tot i que això és més característic per a embarcacions més grans tipus AC72.(AC45)



Fig. 4.4. Embarcació AC45



## 4.2. Geometria i paràmetres del perfil

En el primer pas del disseny d'un sistema d'*hydrofoils* és molt important fer un bon estudi del tipus de perfil hidrodinàmic que s'escau. Aquests tenen un perfil alar amb unes característiques i paràmetres específics que determinen les forces de sustentació i de resistència a l'avanç. A continuació es pot veure a la Fig.4.5 un perfil alar amb tots els seus paràmetres.

Existeixen diferents parts i regions característiques d'un perfil alar.

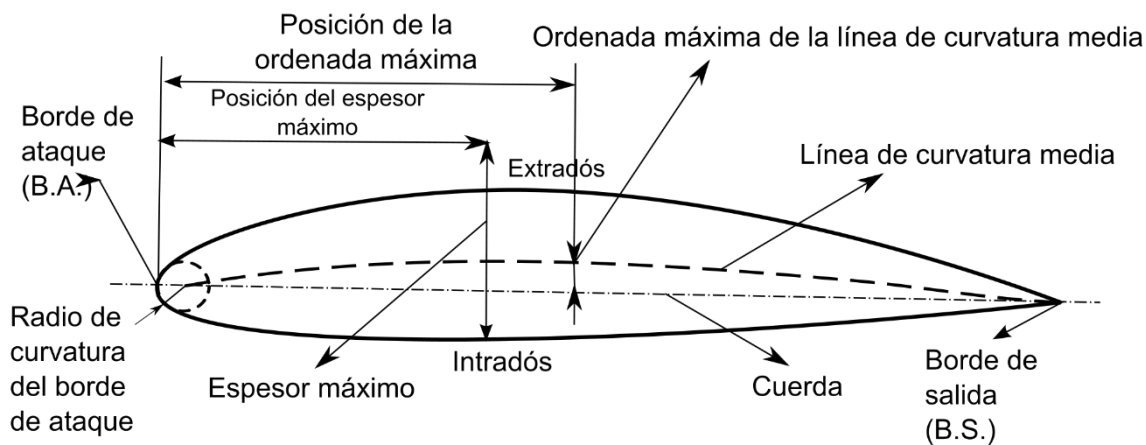


Fig. 4. 5. Característiques d'un perfil alar

La vora enfrontada a la corrent és anomenada caire d'atac o d'entrada. Aquesta part marca l'entrada del flux en l'entorn de l'ala per el que determinarà fortament el rendiment d'aquest. El seu disseny serà més eficient si el rang d'angles d'atac, per el qual no entra en pèrdua, és més gran.

Per l'altre extrem a sotavent es situa la vora de sortida. Aquesta part afilada té per objectiu dirigir la corrent unint el flux que ve del extradós i el de l'intradós. El bon disseny d'aquest permet retardar el despreniment de la capa límit i per tant reduir la resistència a l'avanç i augmentar la sustentació.

A la part superior del perfil tenim l'extradós (Upper surface), aquest correspon a la part exterior del mateix. Aquesta superfície és la cara amb una distribució de pressions negativa.

A la part inferior per conseqüent es té l'intradós (Lower surface), que correspon a la part interior de l'ala. Aquesta cara té una distribució de pressions positiva.



Aquestes zones venen dissenyades per certs paràmetres geomètrics que són els que caracteritzen el comportament hidrodinàmic del perfil.

Un paràmetre important en el disseny dels *hydrofoils* és la corda que correspon a la línia recta que uneix el caire d'atac i el de sortida. En l'anàlisi corresponent a la sustentació aquest influeix fortament ja que és directament proporcional a l'àrea projectada en planta.

Un cop definida la corda és important conèixer el significat de línia de curvatura mitja. Aquesta és la línia equidistant entre l'extradós i l'intradós. Comparant el posicionament de la corda i la curvatura mitja es pot deduir si el tipus de curvatura és positiu, negatiu o de doble curvatura i per tant deduir el caràcter hidrodinàmic del objecte. En el cas dels *hydrofoils* es tracten de perfils amb curvatura positiva, tot i que existeixen alguns de doble curvatura.

El radi de curvatura de la vora d'atac, és un paràmetre que influeix fortament en el comportament d'entrada en pèrdua. Aquest es mesura referenciat en percentatge al valor de la corda, per a valors pròxims al 0 es generen caires d'atac força aguts el que pot provocar desprendiments de la capa límit. El valor per el radi de curvatura en els *hydrofoils* es situa al voltant del 2-3% segons el tipus de perfil.

El gruix és la distància màxima entre l'extradós i l'intradós de l'ala. Sovint es representen aquests valors dividits per el valor de la longitud de corda per obtenir un numero adimensional. El terme "Thickness" és l'espessor de l'ala en tant per cent de la longitud de corda.

La distància màxima entre la línia de curvatura mitja i la línia de corda es denomina curvatura màxima o "Camber", aquest també es descriu en percentatge de la longitud de corda com es pot apreciar en la Fig 4.6.

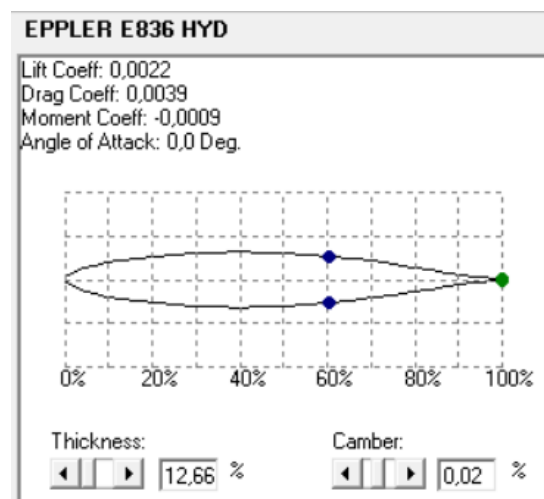


Fig. 4. 6. Perfil alar Eppler 836

### 4.3. Principis i fenòmens fluidodinàmics

En l'estudi de perfils hidrodinàmics existeixen forces i moments que actuen sobre els cossos submergits en el fluid d'estudi. A continuació s'explica els principals conceptes que intervenen per tal de poder realitzar un estudi hidrodinàmic. En aquest estudi les forces i moments hidrodinàmics són provocats només per dos fenòmens bàsics:

- Distribució de pressions a la superfície del cos.
- Distribució de les tensions tallants a la superfície del cos.

El perfil d'aquestes distribucions és el que marca el comportament del cos submergit en el fluid. El resultant d'aquestes distribucions, sobre el centre de pressions del cos, són una força  $R$  i un moment  $M$ . El centre de pressions és el punt on s'ha d'aplicar la resultant de totes les forces exercides per el camp de pressions al cos per que l'efecte resultant sigui el mateix que l'efecte de les pressions. La posició d'aquest centre de pressions depèn de la velocitat del fluid  $V_\infty$  i de l'angle d'atac del perfil. La component vertical d'aquest vector  $R$  representa la força de sustentació  $L$  (Lift) i la component horitzontal és la força de resistència al avanç  $D$  (Drag) (Fig.4.7.)

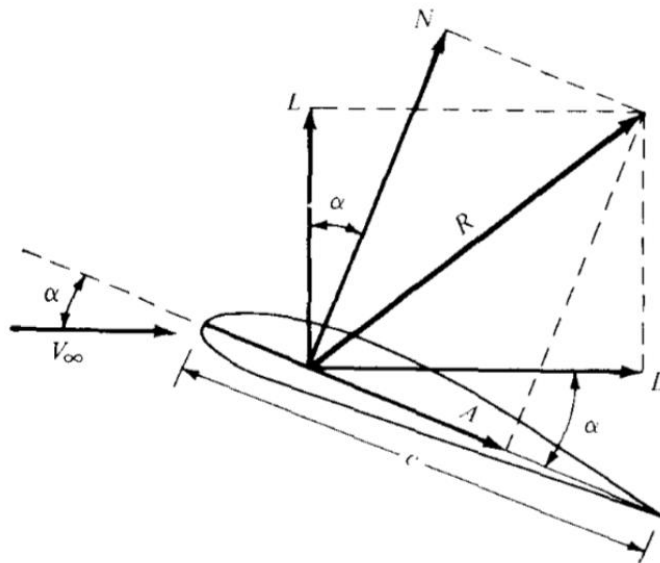


Fig. 4. 7. Forces aerodinàmiques en un perfil alar [1]

#### 4.3.1. Forces de sustentació

Un *hydrofoil*, com s'ha explicat, és un perfil alar que pretén sustentar una embarcació en medi aquàtic. Aquesta sustentació s'aconsegueix dissenyant un perfil que, segons les condicions del fluid, generi una diferencia de pressions entre l'extradós i l'intradós. Segons la distribució de pressions en la superfície alar aquesta obtindrà un diferent caràcter sustentador (Fig.4.8). L'efecte generat per les tensions tangencials també influeix però és pràcticament menyspreable al costat de la distribució de pressions.

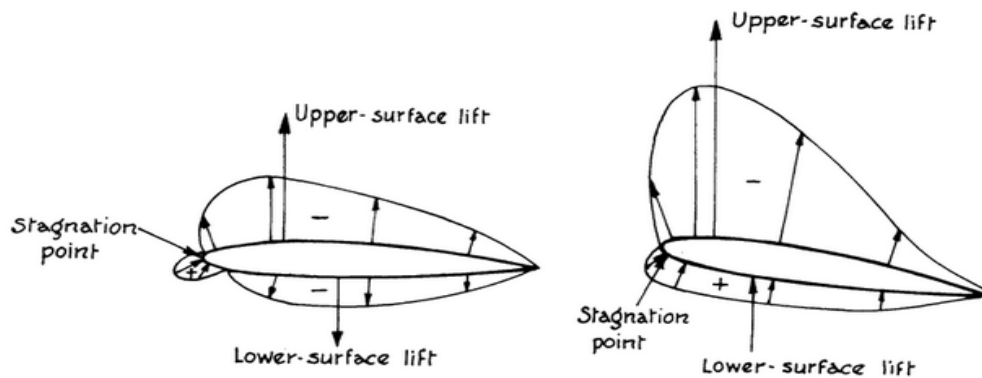


Fig. 4. 8. Representació de les distribucions de pressions sobre un perfil amb  $\alpha=0^\circ$  i  $\alpha>0^\circ$  [2]

Aquest fenomen succeeix degut al fet que el perfil d'estudi no és simètric, és a dir que la longitud de l'extradós i de l'intradós són diferents. Dos partícules entren per el caire d'atac, una es desvia per la línia de corrent més pròxima al extradós i l'altre per la línia més propera a l'intradós. Si estudiem un volum de control d'estudi finit, el flux que entra travessant el perfil alar és el mateix que el que surt del volum de control. Per tant la partícula que recorre l'extradós i la de l'intradós arriben al caire de sortida al mateix temps. És per això que una partícula circula més ràpid que l'altre, aquesta diferencia de velocitats genera un gradient de pressions entre extradós i l'intradós fet que pot generar corrents entre els dos (veure apartat 4.3.9).

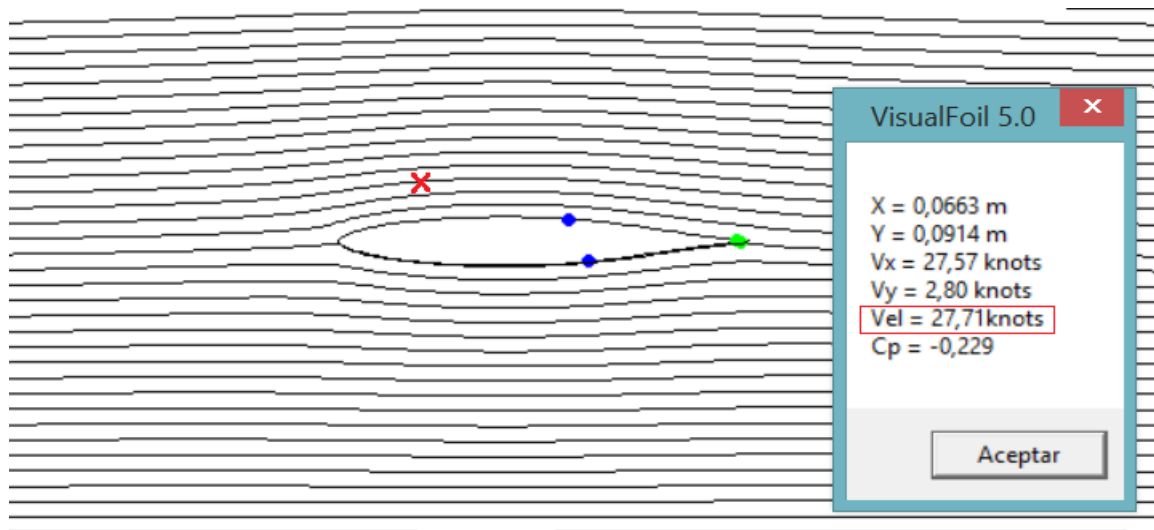


Fig. 4.9. Representació gràfica de la velocitat d'una partícula a l'extradós amb les línies de corrent

Es pot observar com el pas per aquest perfil genera velocitats de les partícules superiors a  $u_{\infty}$  a l'extradós (Fig.4.9), el que provoca zones de pressions negatives que generen un succionament de la superfície i per tant augmenta la sustentació.

Per l'altre banda, a l'intradós es generen pressions positives que també generen forces en la direcció de la sustentació. En la Fig. 4.10. s'aprecia com les pressions de l'extradós són inferiors a les de l'intradós.

En el disseny d'aquest sistema hidrodinàmic la funció principal és dimensionar el caràcter sustentador del perfil. Per enlairar el AC45 cal que la força sustentadora ( $F_L$ ) representada en (Eq. 4.1) sigui superior al pes total de l'embarcació ( $W$ ) (Eq. 4.2). D'aquesta manera es seleccionarà el perfil adient tal que com a mínim aconseguixi enlairar el AC45, tenint en compte altres paràmetres que s'explicaran en els criteris de selecció. La relació paramètrica per el disseny dels *hydrofoils* parteix del coeficient de sustentació, per tal de trobar el mínim possible capaç de sustentar l'embarcació (Eq.4.3).

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A_L \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$F_L \geq W \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$C_{Lmin} = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot A_L} = \frac{m \cdot g}{\frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot n^{\circ} hidroales \cdot (A_p \cdot \sin \alpha)} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

On  $C_L$  és el coeficient de sustentació del perfil,  $A_L$  és l'àrea alar i  $A_p$  és l'àrea del perfil projectada en planta.

Com podem veure aquest coeficient varia amb l'àrea projectada en planta ( $A_p$ ), és a dir depèn de l'angle d'atac del perfil i també de la velocitat del perfil.

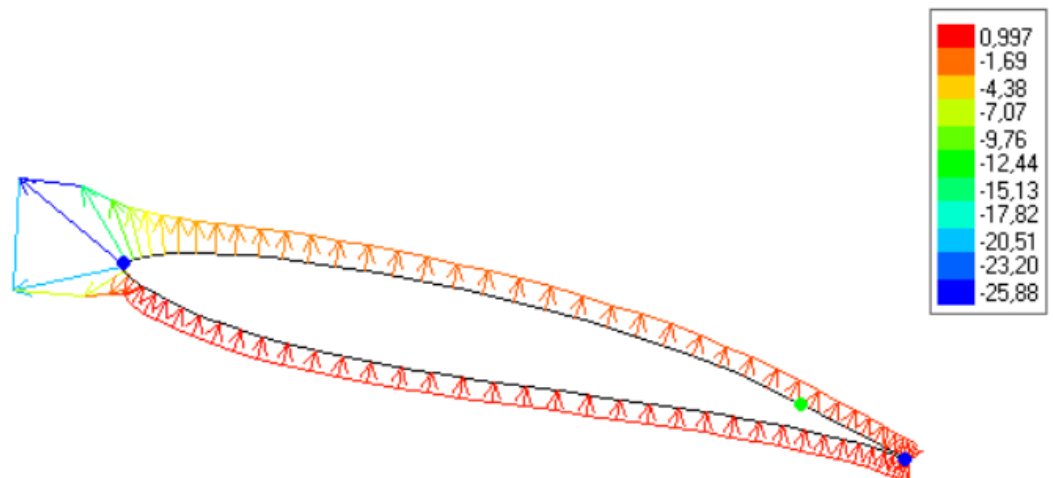


Fig. 4. 10. Distribució de pressions segons el coeficient de pressions a la superfície d'un perfil E817 amb  $\alpha=14^\circ$ .

En el disseny de perfils d'ala és important saber que quan més gran és el radi de curvatura del caire d'atac més gran és el  $C_{LMAX}$ . Una curvatura de l'ala més gran també genera un augment del  $C_{LMAX}$ . El gruix del perfil també augmenta el valor de  $C_{LMAX}$  fins un cert valor on aquest disminueix.

#### 4.3.2. Forces de resistència a l'avanç

És important en els perfils hidrodinàmics observar les forces de fricció generades per els esforços tallants a la superfície sustentadora ja que aquestes influeixen en el rendiment global del perfil alar.

Aquesta resistència hidrodinàmica ve marcada per l'acció de la resistència de fricció i/o de pressió.

Les forces de fricció venen provocades com a conseqüència dels esforços viscosos entre el fluid i el cos. Existeixen dues zones diferenciades on es pot estudiar els diferents efectes d'aquestes forces.

- La capa límit és la zona on l'efecte de les forces viscoses són més importants. És per aquesta raó que considerem que el medi es comporta com viscos en aquesta zona (Fig.4.11).
- La zona de fluid lliure és la zona exterior a la capa límit, on es negligeixen les forces viscoses.

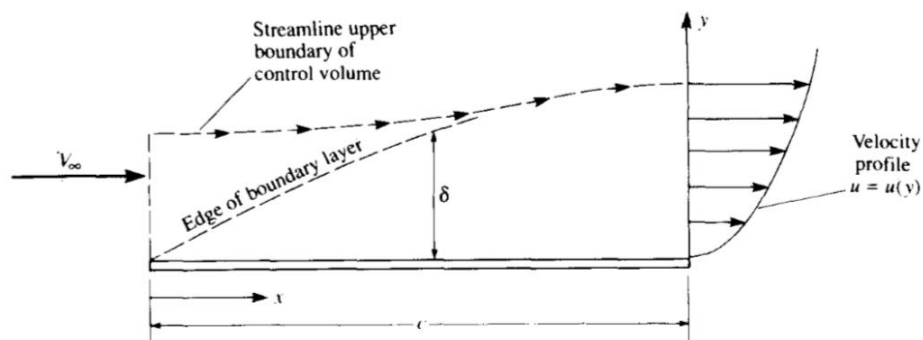


Fig. 4. 11.Representació de la capa límit en regim laminar

Les forces de pressió que generen resistència a l'avanç són provocades per la separació del flux al cos hidrodinàmic. Aquesta separació és deguda a l'aparició d'un gradient de pressions advers i que augmenta les pressions a l'extradós. Aquest fet esdevé quan el fluid pateix una desaceleració degut als esforços tallants. Un cop aquestes partícules es desprenen del perfil es crea una zona de depressió que genera aquest gradient de pressions advers, generant una baixada important del rendiment hidrodinàmic (Fig.4.12 i Fig.4.13).

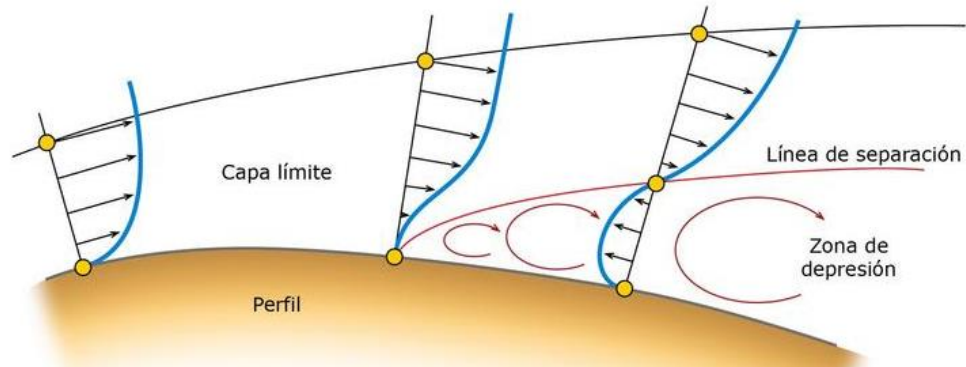


Fig. 4.12. Il·lustració d'un gradient de pressions advers i per tant del desprendiment de la capa límit

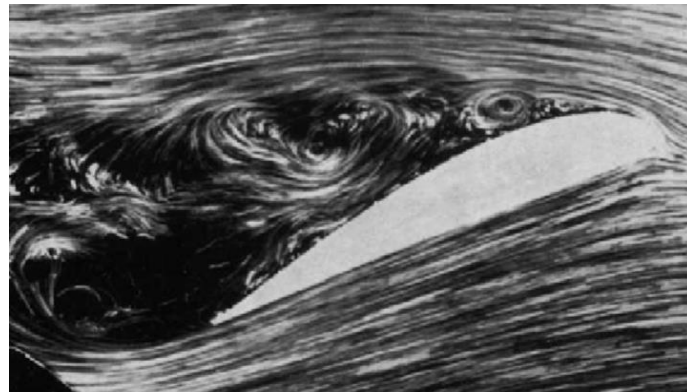


Fig. 4.13. Imatge il·lustrant la separació de la capa límit [4]

El coeficient de resistència al avanç ve donat per la següent equació:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot A_P} \quad (\text{Eq.4.4})$$

Com podem veure aquest també té una forta relació amb l'àrea projectada en planta del perfil. En l'equació 4.3 s'ha observat com l'àrea projectada està directament relacionada amb l'angle d'atac del perfil i per tant com influeix aquesta en els diferents paràmetres hidrodinàmics.

### 4.3.3. Moment de capcineig

El capcineig en el món de la navegació és la rotació sobre l'eix longitudinal de l'embarcació. Aquest pot ser generat per les onades o per un desequilibri de forces en el casc del vaixell.

En aquest cas l'estudi del capcineig té a veure amb el fet que els *hydrofoils* poden desestabilitzar fortament embarcacions com els AC45. Aquesta és una de les causes d'accidents més perilloses en aquest tipus de competició. El capcineig pot provocar que la proa es submergeixi en l'aigua provocant una desacceleració molt forta, posant en perill l'estructura del catamarà i la seguretat dels tripulants.

En general, el moment de capcineig sobre un perfil aerodinàmic son funció de l'angle d'atac. De totes maneres existeix un punt sobre el perfil on el moment és independent de l'angle d'atac. Aquest punt és determinat experimentalment calculant el  $C_m$  per un rang de valors de  $C_L$  i en diferents punts de corda del perfil. Amb aquest procediment es troba un punt especial on  $C_m$  és virtualment constant i independent del  $C_L$ . Aquest punt és el centre aerodinàmic i es troba aproximadament entre el 23-25% de la longitud de corda a partir del caire d'atac (Fig.4.14). [4]

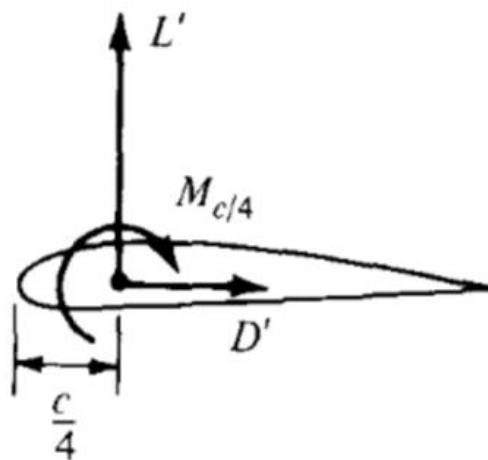


Fig. 4.14. Representació gràfica del moment de capcineig



Valors negatius d'aquest coeficient de capcineig donen lloc a moviments de picat del perfil. Aquest coeficient ve donat per:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot A_P \cdot c} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

#### 4.3.4. Entrada en pèrdua

L'angle d'atac és un dels paràmetres de control més importants a l'hora de dirigir un perfil hidrodinàmic o aerodinàmic. Com ja s'ha vist en els apartats 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, l'angle d'atac influeix en l'àrea projectada en planta i per tant afecta a la sustentació, resistència a l'avanç i capcineig de l'embarcació.

L'angle d'atac d'un perfil alar és l'angle format per la corda del perfil i la direcció del corrent lliure del fluid (Fig.4.7). Depenent del angle d'atac del perfil obtindrem més o menys sustentació. Quant més augmentem l'angle d'atac més sustentació obtindrem fins a atènyer un angle crític, on a partir d'aquest l'efecte sustentador baixa fortament (Fig.4.15).

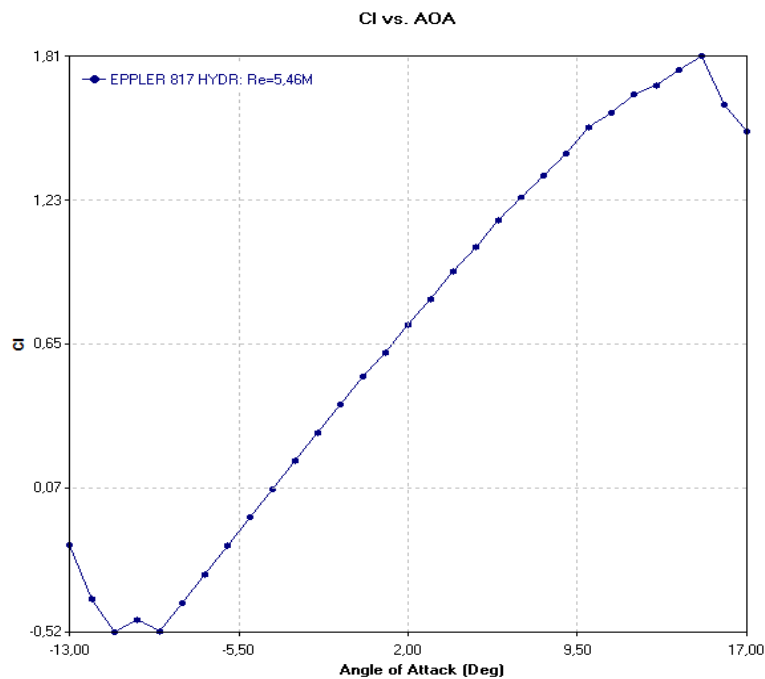


Fig. 4.15. Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$  amb  $Re = 5,46 \cdot 10^6$

Un cop atès aquest angle, si continuem augmentant l'angle d'atac la capa límit es desprèn i el perfil entra en pèrdua i per conseqüent deixa de sustentar.

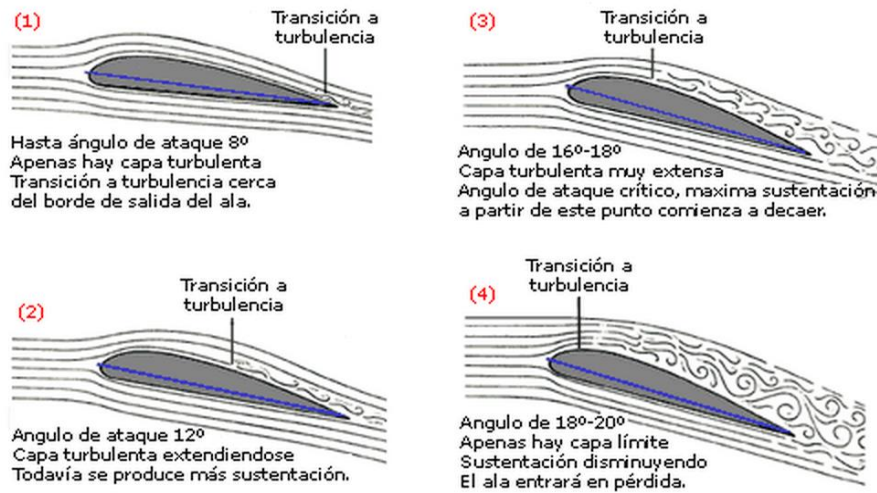


Fig. 4.16. Explicació gràfica del fenomen d'entrada en pèrdua per un perfil alar

#### 4.3.5. Cavitació

La cavitació és un fenomen fluidodinàmic present en el món de la nàutica que genera moltes avaries mecàniques, afecta fortament en el caràcter sustentador i augmenta la resistència a l'avanç. Com s'observa en l'equació de Bernoulli (sense freqs) quant augmenta la velocitat del fluid ( $u$ ), la pressió ( $P$ ) decreix. (Eq.4.6)

$$P + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 = \text{const} \quad (\text{Eq.4.6})$$

La cavitació és un fenomen conseqüència del camp fluidodinàmic de pressions i velocitats. És un fenomen destructiu que provoca erosió i destrucció del material. És per aquesta raó que s'apliquen pintures especials per evitar-ho. Aquest és un procés de transformació d'una fase líquida en vapor quan es troba en certes condicions termodinàmiques. D'aquesta manera el fenomen succeeix quan el fluid pateix pressions baixes a temperatura constant. [5]

Aquest canvi de fase líquid-vapor, genera l'aparició de bombolles de vapor que ocupen un volum més elevat que el que ocupava el líquid. Quan deixen de trobar-se en les condicions termodinàmiques que les estableixen aquestes imploten. Aquestes bombolles s'omplen ràpidament per l'aigua que l'envolta provocant una acceleració del líquid molt forta. Aquesta acceleració genera un micro-jet que xoca contra les parets del perfil amb una velocitat molt elevada que pot provocar la fallida de metalls. Si aquest col·lapse de les bombolles es duu a

terme a la superfície del *hydrofoil* pot generar picades en el material, degut a les fortes pressions de xoc. Aquestes pressions poden arribar fins a 1000MPa. Aquest fenomen generalment ve acompanyat de soroll i vibracions provocades per la creació i implosió cavitacional.(Fig.4.17)

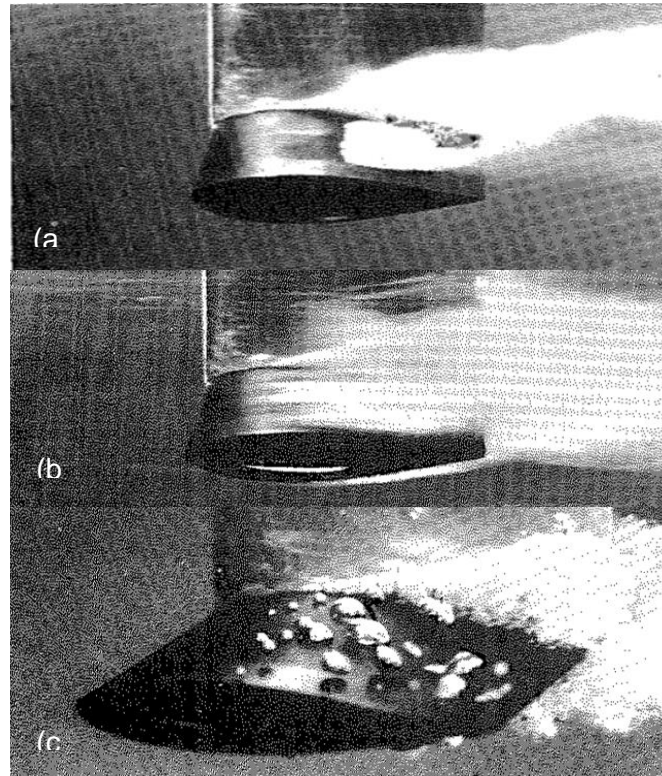


Fig. 4. 17. (a) A mesura que augmenta la velocitat la cavitació apareix primer en el punt on es separa la capa límit laminar (b) A més velocitat la cavitació apareix prop del punt de màxima velocitat (c) Imatge de la cavitació observada amb llum estroboscòpica, s'observen les bombolles individuals [5]

El flux cavitacional en els *hydrofoils* succeeix a l'extradós del perfil. Aquest penalitza molt el caràcter sustentador i hidrodinàmic, és per aquesta raó que s'intenta evitar la seva aparició (Fig.4.18).

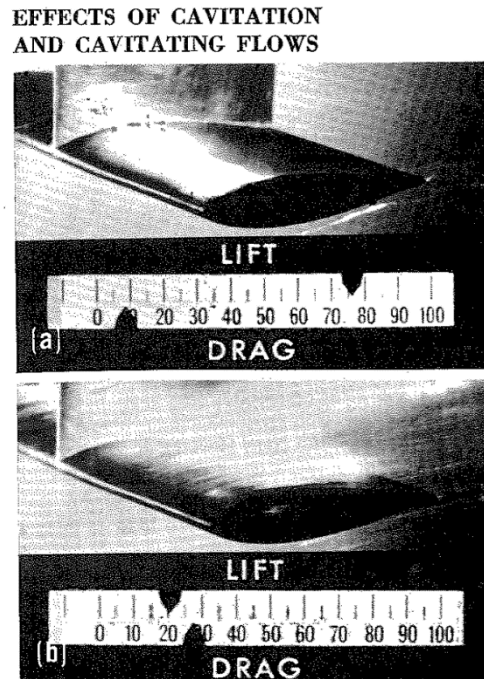


Fig. 4.18. Efecte en el comportament sustentador i resistència a l'avanç d'un perfil d'ala sense cavitació (a) i amb cavitació (b) [5]

#### 4.3.6. Força de resistència a l'avanç induïda

La força de resistència a l'avanç induïda és un fenomen fluidodinàmic que succeeix a la punta del *hydrofoil*. Aquest fenomen consisteix en la creació d'un vòrtex a la punta del *hydrofoil* provocat per la diferència de pressions entre l'extradós i l'intradós.

El que succeeix és que en la part de l'extradós existeix una zona de forta depressió mentre que a la part l'intradós hi han pressions positives elevades. A mesura que ens apropem a la punta de l'*hydrofoil* les partícules d'aigua comencen a fluctuar de l'intradós cap a l'extradós degut a aquesta diferència de pressions. Les pressions positives busquen compensar les depressions a l'extradós i és a l'extrem del *hydrofoil* on succeeix aquest fenomen. El resultat és un corrent d'aigua que, combinat amb l'avanç de l'embarcació, genera un vòrtex a la punta del *hydrofoil* (Fig. 4.19).

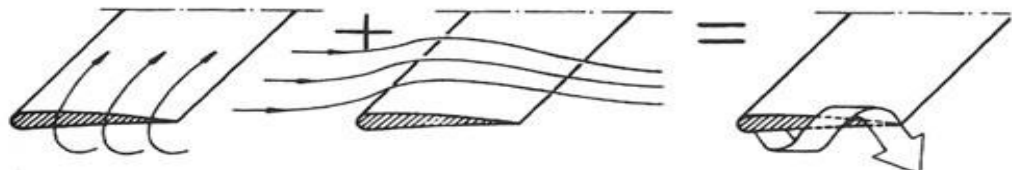


Fig. 4.19 Representació gràfica del fenomen de resistència a l'avanç induïda

#### 4.4. Selecció del perfil

Per tal de realitzar una bona selecció del perfil hidrodinàmic estableixen uns paràmetres de control. En l'estudi d'aquests paràmetres alguns es buscarà maximitzar-los i d'altres mantenir-los dins d'interval·ls de control per tal d'optimitzar la maniobrabilitat i velocitat de l'AC45.

##### 4.4.1. Criteris de selecció

- Variació del rendiment hidrodinàmic ( $\beta_{\max}$ ) en un funció de l'angle d'atac:

El rendiment hidrodinàmic ve definit per el quocient entre el coeficient de sustentació  $C_L$  i el coeficient de resistència a l'avanç  $C_D$ . En l'anàlisi d'aquest paràmetre es busca maximitzar el rendiment hidrodinàmic per el rang de valors  $\alpha$ . També és important que els valors de  $\beta$  es mantinguin a prop del valor  $\beta_{\max}$  en un rang d'angles d'atac gran per tal d'obtenir un bon rendiment global. Per tal de tractar els diferents perfils amb igualtat, considerarem acceptable un interval d'angles d'atac que compregui el valor màxim de rendiment aerodinàmic del valor d'aquest fins a un 10% inferior al màxim.

- Variació del coeficient de sustentació  $C_L$  en funció de l'angle d'atac:

Es busca el perfil hidrodinàmic que generi una sustentació capaç d'enlairar l'embarcació. Aquest fet no vol dir que es busqui maximitzar el paràmetre  $C_L$ , però sí que el rang de valors de l'angle d'atac per tals que l'embarcació pugui enlairar-se sigui ample. D'altra banda és important observar quin és el caràcter d'entrada en pèrdua dels diferents perfils. Aquest determinarà la violència amb la que pot incidir la proa en l'aigua a l'hora d'entrar en pèrdua i per tant obtenir una major seguretat per la tripulació i l'embarcació. És a dir es busca una entrada en pèrdua el més suau possible.

Per altre banda és important que el valor de l'angle d'entrada en pèrdua sigui el més elevat possible d'aquesta manera s'evita que l'embarcació no entri en pèrdua amb angles petits i per tant fàcils d'assolir.

- Variació del coeficient de capcineig  $C_m$  en funció  $\alpha$ :

En l'estudi del moment de capcineig generat per el perfil interessa, que per valors d'angle d'atac petits el valor del moment sigui el més petit possible per evitar que aquest generi moviments de picat. Tot i que per angles d'atac elevats (és a dir pròxims a la pèrdua) interessa que  $C_m$  augmenti ja que així genera un moviment que auto-estabilitza el perfil, disminuint l'angle d'atac.

- $C_D$  en funció de  $C_L$

És important realitzar un estudi de la resistència a l'avanç en funció de la sustentació ja que interessa que el  $C_D$  es mantingui mínim per rangs amplis de sustentació.

Per tal de poder dimensionar la sustentació partim de l'equació que iguala la força sustentadora ( $F_L$ ) amb el pes ( $W$ ) de l'AC45. Per controlar el caràcter sustentador de cada perfil analitzat, es crea un paràmetre  $\lambda$  que representa el tant per u del pes de l'AC45 enlairat per el sistema de hidroales. Aquest paràmetre servirà com a criteri per la selecció del perfil.

S'obté llavors, introduint el paràmetre  $\lambda$  a l'equació 4.3, la següent equació 4.7:

$$\lambda = \frac{C_{Lmin} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot (A_p \cdot \sin \alpha)}{m \cdot g} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

De manera que si  $\lambda \geq 1$  es considera que l'embarcació s'enlaira, mentre que si  $0 < \lambda < 1$  l'embarcació s'enlairarà un tant per cent.

Numèricament s'obté la següent equació (Eq. 4.8):

$$\lambda = \frac{C_{Lmin} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot A_L}{m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} C_{Lmin} \cdot 1027 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(12,86 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 2 \text{ hidroales} \cdot \left(A_p \cdot \sin \alpha_{hidroala} \frac{m^2}{hidroala}\right)}{(437,5 \text{ kg} + 1320 \text{ kg} + 50 \text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (\text{Eq. 4.8})$$



#### 4.4.2. Anàlisi dels perfils

En el projecte, l'anàlisi dels diferents tipus de perfil hidrodinàmic s'ha realitzat seleccionant aquells que figuren com específics per *hydrofoils* en la base de dades UIUC Airfoil Data Base. Aquests es poden trobar en la base de dades del software Visualfoil 5.0.

A continuació es mostra un primer anàlisi individual de cadascun dels perfils seleccionats.

##### Perfil EPPLER 817 *HYDROFOIL* AIRFOIL

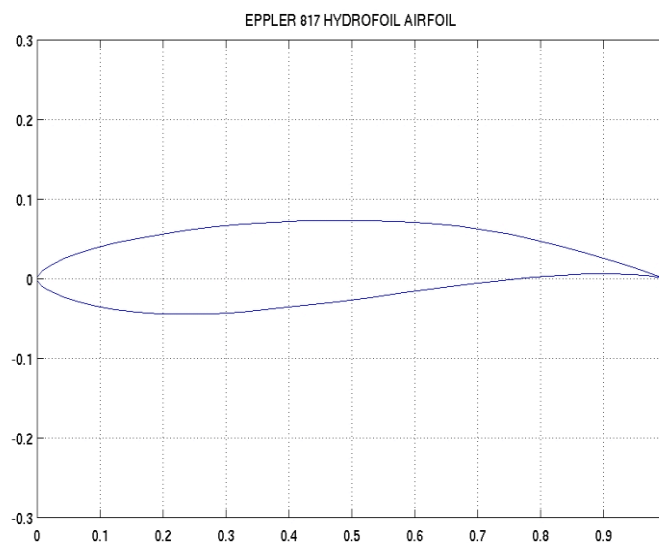


Fig. 4. 20. Perfil Eppler 817

Primerament en l'estudi de la gràfica que confronta el coeficient de sustentació i l'angle d'atac del perfil, es veu com aquest té un pic de sustentació en l'angle  $15^\circ$  amb valor 1,81 (Fig. 4.21). La regressió lineal troba una entrada en pèrdua en els últims angles suau. Aquest perfil entra en pèrdua al atènyer l'angle de  $17^\circ$ .

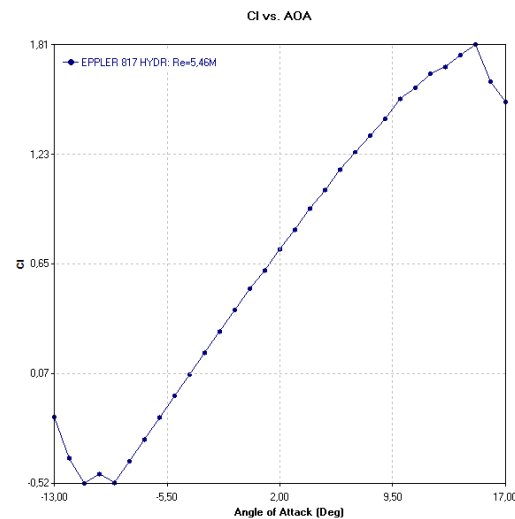


Fig. 4. 21 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$

Segonament analitzant el rendiment hidrodinàmic s'observa a la Fig. 4.22 un pic aïllat amb una  $\beta_{\max} = 133,37$ . Per decidir quin és el rang d'estudi segons el rendiment del perfil no es tindrà en compte aquest pic i per tant es seleccionarà com a màxim  $\beta_{\max} = 113,06$  ja que és el valor per el qual existeix més valors al seu voltant. D'aquesta manera s'obté un rang d'estudi d'angles d'atac entre  $2^\circ$  i  $11^\circ$ .

Per últim en la Fig. 4.23 els valors del coeficient de capcineig en la zona d'estudi presenen molt poca variació però és un valor força elevat ( $C_m \approx -0,13$ ).

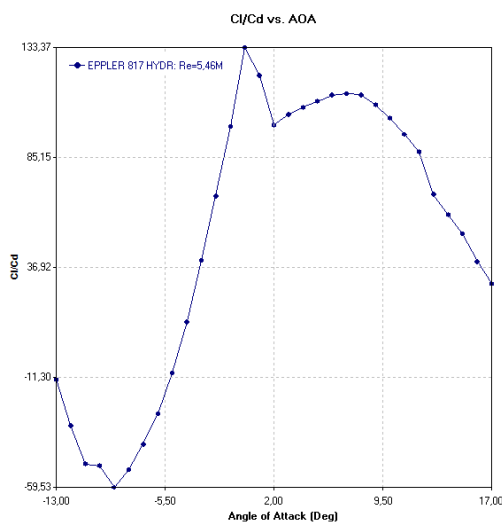


Fig. 4. 22 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$

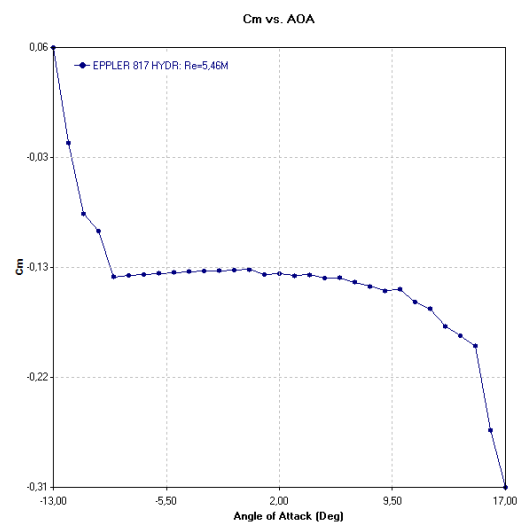


Fig. 4. 23 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$



En la taula 4.1 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
1	0,6134	0,00507	-0,1323	120,986	0,051
2	0,7271	0,00732	-0,1316	99,331	0,121
3	0,8302	0,00798	-0,1334	104,035	0,208
4	0,9425	0,0088	-0,1328	107,102	0,315
5	1,0406	0,00947	-0,1354	109,884	0,434
6	1,149	0,01021	-0,1352	112,537	0,575
7	1,2403	0,01097	-0,1389	113,063	0,724
8	1,3306	0,01182	-0,1426	112,572	0,887
9	1,4194	0,01312	-0,1462	108,186	1,063
10	1,526	0,01491	-0,145	102,347	1,269
11	1,5833	0,01663	-0,1557	95,207	1,446
12	1,658	0,01892	-0,1616	87,632	1,650
13	1,6951	0,02458	-0,1764	68,963	1,826

Taula 4. 1. Resultats de la simulació del perfil E817

En l'anàlisi de la capacitat sustentadora es veu com el sistema és capaç d'enlairar l'embarcació per angles entre  $9^\circ$  i  $17^\circ$  tot i que tenint en compte el rang d'estudi on els rendiments es mantenen elevats només succeiria en els angles amb valor  $9^\circ$  i  $10^\circ$ .

Finalment s'observa que els valors del moment de capcineig segons l'angle d'atac es mantenen quasi constants en valors per sobre del -0,1 per angles de l'interval d'estudi. També es pot veure com per valors pròxims al angle d'entrada en pèrdua el valor del coeficient del moment de capcineig augmenta i per tant estabilitza l'ala.

### Perfil EPPLER 818 *HYDROFOIL* AIRFOIL

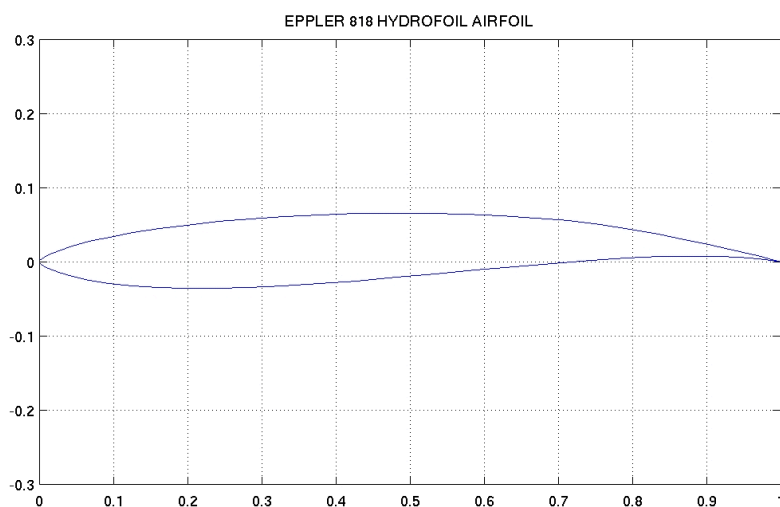


Fig. 4. 24. Perfil Eppler 818

Aquest perfil presenta una sustentació màxima ( $C_{Lm\grave{a}x.}=1,54$ ) quan ateny un angle d'atac de  $11^\circ$ . Una vegada es supera aquest angle, el perfil deixa de generar sustentació i entra en pèrdua. Per tant, tot hi ser l'angle que aporta més sustentació al perfil, es considera que es troba en una zona molt poc estable i no s'inclourà a l'hora de realitzar l'estudi (Fig. 4.25).

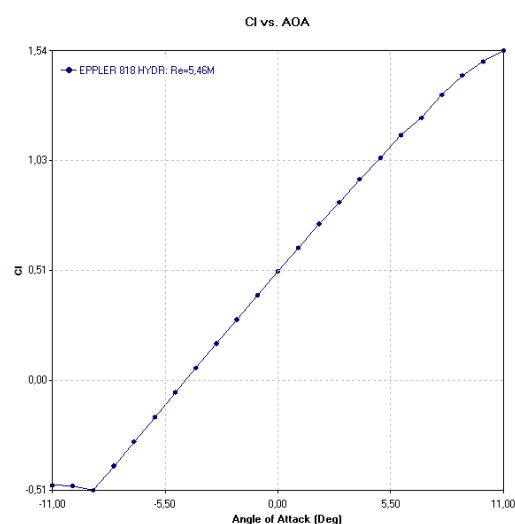


Fig. 4. 25 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 818 en funció de  $\alpha$

Pel que fa el diagrama del rendiment hidrodinàmic es troba una zona relativament plana entre els angles  $4^\circ$  i  $8^\circ$ , amb un rendiment màxim en aquesta zona de ( $\beta_{\text{màx.}}=118,22$ ) per un angle de  $7^\circ$ . S'observa en la Fig. 4.26 com el valor de màxima sustentació, esmentat anteriorment, no presenta un bon rendiment. Per últim es pot dir que en la Fig. 4.27 els valors del coeficient de capcineig varien bastant en la zona d'estudi.

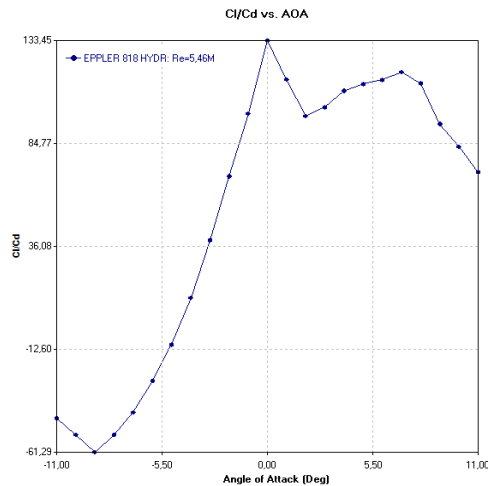


Fig. 4. 26 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 818 en funció de  $\alpha$

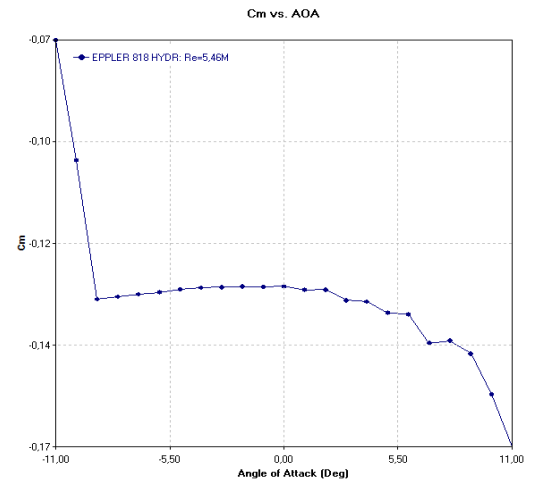


Fig. 4. 27 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 818 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.3 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
$0^\circ$	0,5108	0,00383	-0,129	133,368	0,000
$1^\circ$	0,6198	0,00539	-0,1299	114,991	0,052
$2^\circ$	0,732	0,00749	-0,1298	97,730	0,122
$3^\circ$	0,833	0,00817	-0,1323	101,958	0,209
$4^\circ$	0,942	0,00859	-0,1326	109,662	0,315
$5^\circ$	1,0409	0,00922	-0,1352	112,896	0,434
$6^\circ$	1,1478	0,00999	-0,1356	114,895	0,574
$7^\circ$	1,2276	0,01036	-0,1424	118,494	0,716
$8^\circ$	1,3356	0,0118	-0,1418	113,186	0,890

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
9°	1,4275	0,01519	-0,1449	93,976	1,069
10°	1,4917	0,01794	-0,1544	83,149	1,240
11°	1,5433	0,02168	-0,1667	71,185	1,410

Taula 4. 2 Resultats de la simulació del perfil E818

Es pot observar a la taula com el rang d'angles d'atac escollits no hi ha cap que generi la suficient força de sustentació per aixecar l'embarcació. No obstant si que existeixen valors per els quals l'embarcació s'aixeca ( $\lambda > 1$ ) però aquests valors s'han descartat amb anterioritat per no pertànyer a la zona d'estabilitat.

Per últim s'aprecia que els valors del coeficient de capcineig en la zona d'estudi presenta molt poca variació però és un valor força elevat ( $C_m \approx 0,14$ ).

### Perfil EPPLER 836 *HYDROFOIL* AIRFOIL

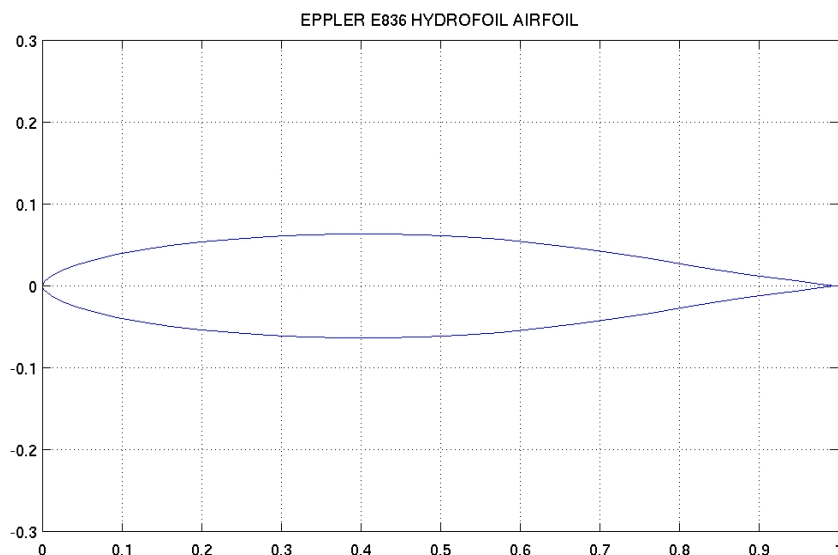


Fig. 4. 28. Perfil Eppler 836

En el primer gràfic del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.29) s'observa com aquest té una regressió lineal amb una entrada en pèrdua suau. Aquesta gràfica marca com  $C_{L\text{màx}}$  un valor de 11,32 en un angle d'atac de  $14^\circ$ . L'angle crític d'entrada en pèrdua és de  $16^\circ$ .

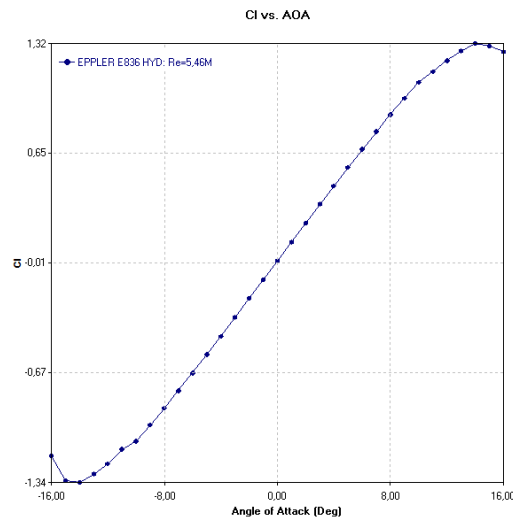


Fig. 4. 29 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 836 en funció de  $\alpha$

Segonament, en el gràfic representant el rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.30) s'ateny un valor  $\beta_{\text{màx}}=91,62$  per un angle d'atac de  $9^\circ$ . El rang d'angles d'atac considerats com rang d'estudi es troben entre els  $6^\circ$  i els  $12^\circ$ . Es pot observar en la Fig. 4.31 com el coeficient de capcineig al voltant del 0 és pràcticament nul.

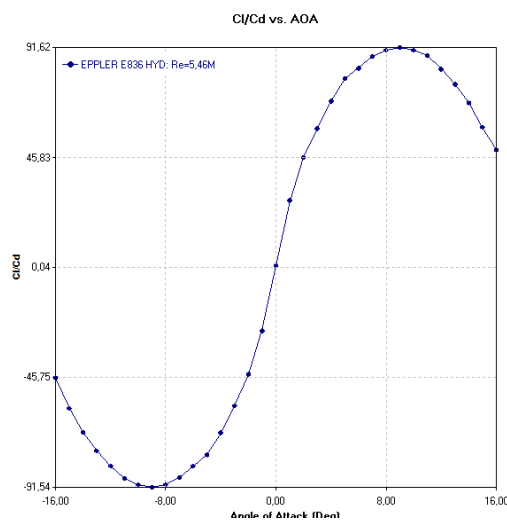


Fig. 4. 30 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$

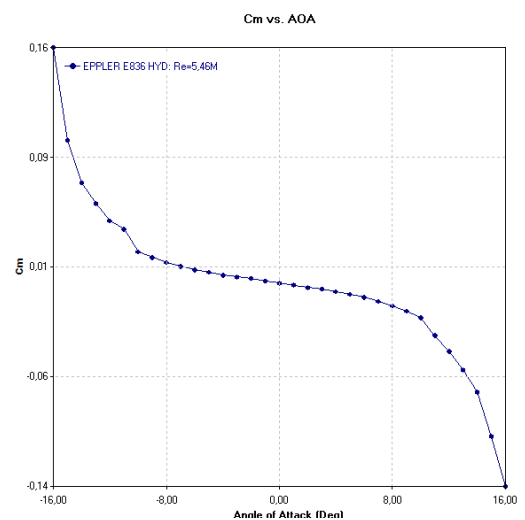


Fig. 4. 31 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 836 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.3 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
5	0,5678	0,00721	-0,008	78,752	0,237
6	0,6778	0,00817	-0,0099	82,962	0,339
7	0,7838	0,00892	-0,0126	87,870	0,457
8	0,8869	0,00979	-0,0158	90,592	0,591
9	0,9865	0,01077	-0,0195	91,597	0,739
10	1,0825	0,01197	-0,0238	90,434	0,900
11	1,1456	0,01297	-0,036	88,327	1,047
12	1,2132	0,01469	-0,0466	82,587	1,208
13	1,2708	0,01665	-0,0594	76,324	1,369
14	1,3171	0,01921	-0,0745	68,563	1,526

Taula 4. 3 Resultats de la simulació del perfil E836

El sistema d' *hydrofoils* aconsegueix fer front al pes de l'embarcació per angles d'atac entre els 11° i els 16° tot i que segons el rang d'estudi, els angles per el qual els rendiments es mantenen alts són 11° i 12°.

Finalment en l'estudi del moment de capcineig es veu com aquest manté valors quasi nuls per valors d'angle dins del rang d'estudi, per tant no generen moviment de picat. A més a més en angles d'atac propers al angle d'entrada en pèrdua el valor de  $C_m$  augmenta per tal de auto-estabilitzar l'ala del perfil.

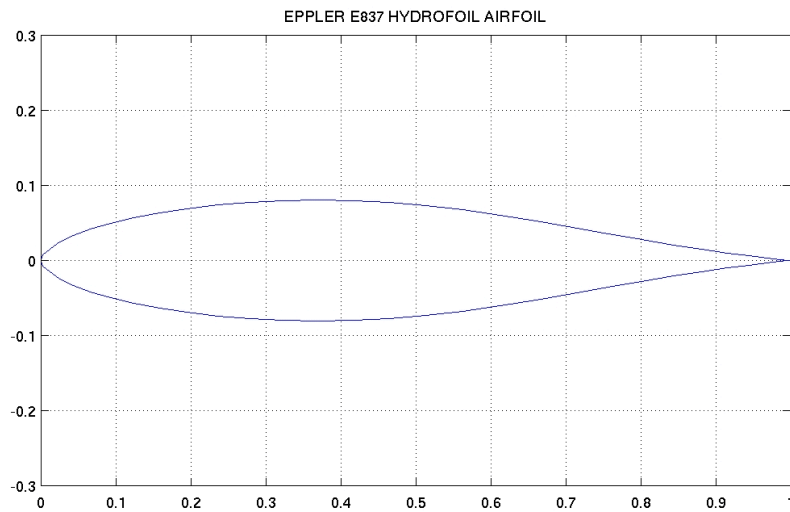
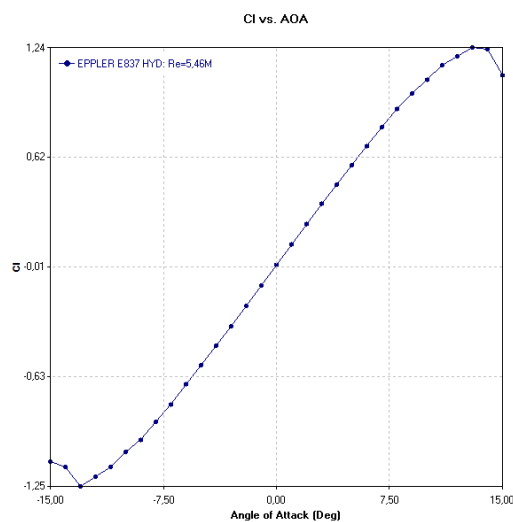
**EPPLER 837 HYDROFOIL AIRFOIL**

Fig. 4. 32. Perfil Eppler 837

Es pot veure que en la gràfica de  $C_L$  en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.33) que aquest té un pic de sustentació màxim de 1,24 en un angle d'atac de  $13^\circ$ . Per una altra banda es veu com el comportament de la regressió de  $C_L$  arriba fins un angle d'entrada en pèrdua de  $15^\circ$  de manera no brusca.

Fig. 4. 33 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 837 en funció de  $\alpha$

En la gràfica que representa el rendiment hidrodinàmic en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.34), es veu com aquest ateny una  $\beta_{\max}=88,03$  per un angle d'atac de  $7^\circ$ . El rang de valors al voltant de  $\beta_{\max}$  amb valor semblant a aquest, és a dir el rang d'estudi dels angles d'atac, varia entre  $6^\circ$  i  $12^\circ$ . Dintre d'aquesta zona d'estudi el rendiment es manté gairebé constant. Es pot observar en la Fig. 4.31 com el coeficient de capcineig al voltant del 0 es pràcticament nul.

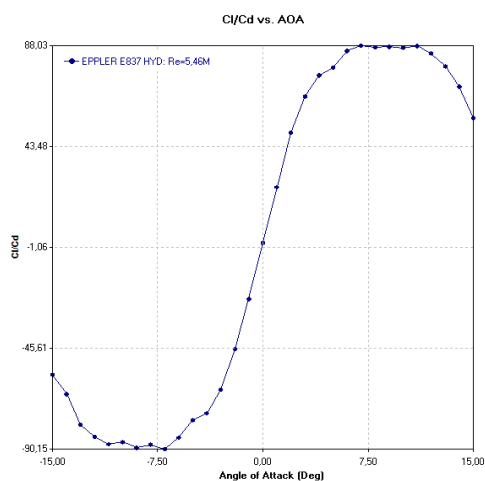


Fig. 4. 34 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 837 en funció de  $\alpha$

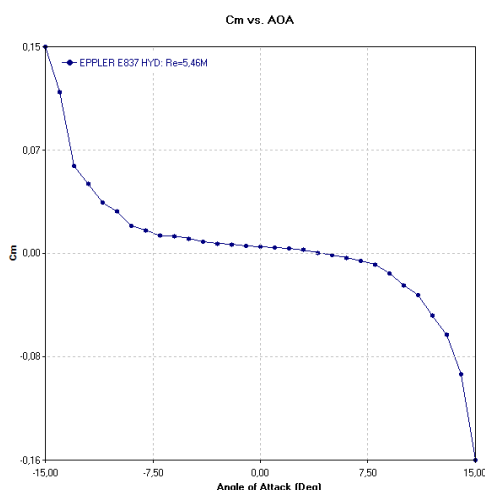


Fig. 4. 35 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 837 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.4 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
5	0,571	0,00729	-0,0058	78,326	0,238
6	0,6793	0,00792	-0,0079	85,770	0,340
7	0,7861	0,00893	-0,0101	88,029	0,459
8	0,8906	0,01019	-0,0127	87,399	0,593
9	0,978	0,01117	-0,0193	87,556	0,732
10	1,0556	0,01212	-0,028	87,096	0,878
11	1,1383	0,01294	-0,0351	87,968	1,040
12	1,1875	0,01404	-0,0501	84,580	1,182



$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
<b>13</b>	1,2387	0,01569	-0,0643	78,948	1,334
<b>14</b>	1,2295	0,01758	-0,093	69,937	1,424
<b>15</b>	1,0812	0,01926	-0,1561	56,137	1,340

Taula 4. 4 Resultats de la simulació del perfil E837

Dins del rang d'estudi, el sistema d'*hydrofoils* aconsegueix enlairar l'embarcació només en els angles 11° i 12°. El sistema aconsegueix enlairar també l'AC45 per valors d'angle d'atac entre 13° i 15° tot i que en aquests angles el rendiment hidrodinàmic disminueix notablement.

En l'anàlisi de la gràfica del moment de capcineig en funció de l'angle d'atac es remarca que aquest és molt petit per valors en la zona d'estudi i amb variacions molt petites, pel que ofereix poca tendència a generar un moviment de picat. D'altra banda aquest respon bé quan s'apropa a valors pròxims a l'angle d'entrada en pèrdua ja que augmenta el valor de  $C_m$  generant un efecte d'auto-estabilització.

### Perfil EPPLER 838 *HYDROFOIL* AIRFOIL

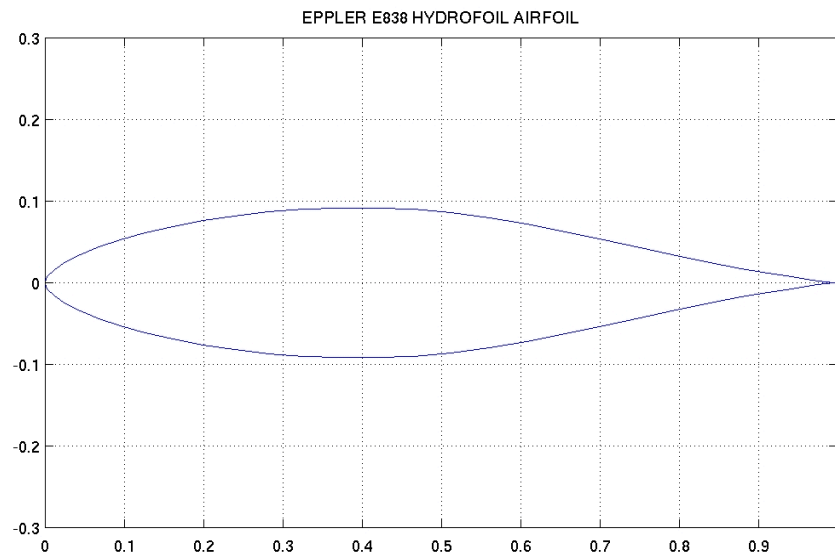


Fig. 4.36. Perfil Eppler 838

En la gràfica del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.37) s'observa que aquesta té un pic de sustentació màxima de 1,16 en un angle d'atac de  $12^\circ$ . D'altra banda el perfil estudiat té un angle crític d'entrada en pèrdua de  $16^\circ$ . Aquesta transició es pot veure com succeeix de manera suau.

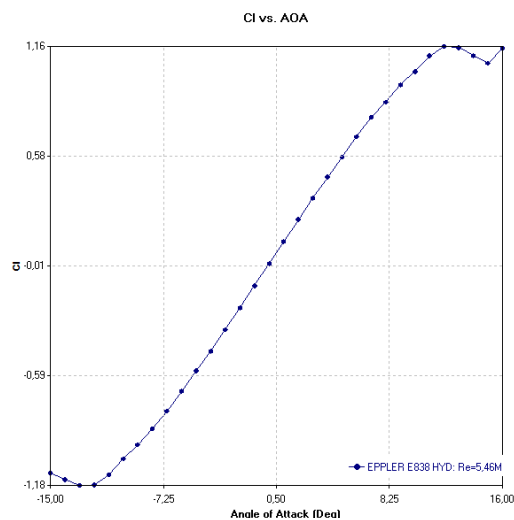


Fig. 4. 37 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$

Per altre banda es pot veure en la gràfica del rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.38) com aquest té un valor de rendiment màxim de  $\beta_{m\grave{a}x.}$  de 84,47 per un angle d'atac de pròxim als  $4^\circ$ . S'ha determinat el rang d'angles d'atac amb rendiment semblant al màxim com la zona estable del perfil. És a dir la zona d'estudi correspon al rang comprès entre els  $4^\circ$  i  $12^\circ$  on el valor del rendiment es manté força constant al voltant de  $\beta_{m\grave{a}x.}$ . Es pot observar en la Fig. 4.39 com el coeficient de capcineig al voltant del 0 és pràcticament nul.

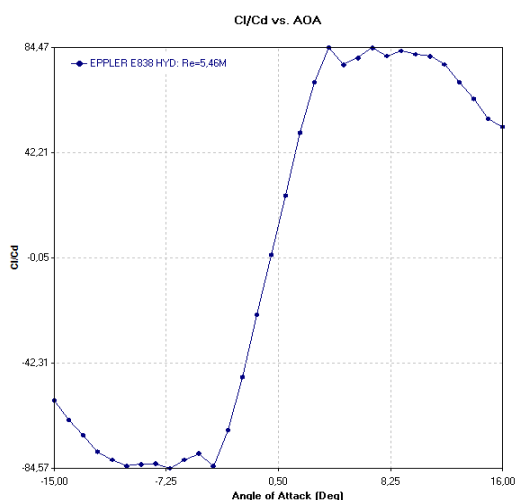


Fig. 4. 38 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 838 en funció de  $\alpha$

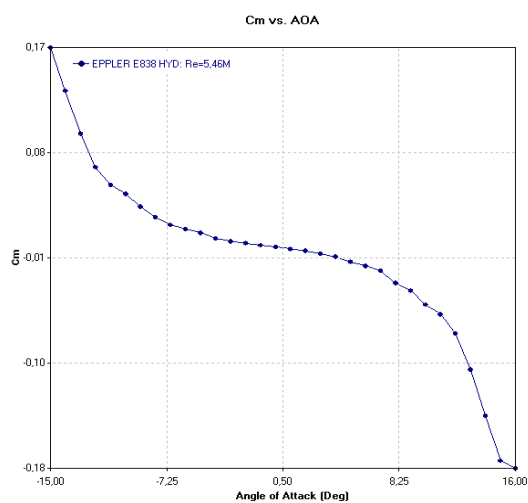


Fig. 4. 39 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 838 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.5 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
2	0,2403	0,00478	-0,003	50,272	0,040
3	0,354	0,00502	-0,0055	70,518	0,089
4	0,4669	0,00553	-0,008	84,430	0,156
5	0,5723	0,00738	-0,0122	77,547	0,239
6	0,6809	0,00848	-0,0155	80,295	0,341
7	0,7861	0,00932	-0,0194	84,345	0,459
8	0,8645	0,01067	-0,0297	81,022	0,576
9	0,9579	0,01153	-0,036	83,079	0,717
10	1,029	0,01258	-0,0475	81,797	0,855
11	1,1121	0,01374	-0,0556	80,939	1,016
12	1,1623	0,01498	-0,0716	77,590	1,157
13	1,1556	0,01638	-0,1013	70,549	1,245
14	1,113	0,01741	-0,1396	63,929	1,289

Taula 4. 5 Resultats de la simulació del perfil E838

S'observa com dins del rang d'estudi, el sistema d'*hydrofoils* aconsegueix enlairar l'embarcació en els angles d'atac 11° i 12°. De la mateixa manera es conclou que com en el rang entre 13° i 16° també s'aconsegueix la sustentació requerida però en aquests el rendiment hidrodinàmic es redueix notablement.

Finalment en l'estudi del moment de capcineig es pot dir que, per valors d'angles d'atac baixos un comportament estable i amb valors molt baixos. Al mateix temps s'observa com per els angles elevats pròxims a l'entrada en pèrdua el valor de  $C_m$  augmenta forçament generant d'aquesta manera un efecte auto-estabilitzador.

## Perfil EPPLER 874 *HYDROFOIL* AIRFOIL

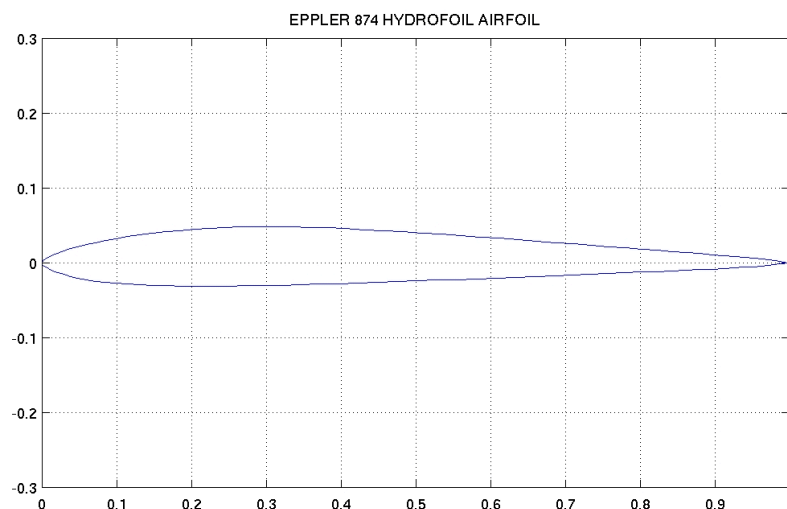


Fig. 4.40. Perfil Eppler 874

El diagrama del coeficient de sustentació presenta un màxim de 1,41 quan ateny un angle d'atac de  $13^\circ$ . Es pot observar a la Fig. 4.41 que una vegada es sobrepassa aquest angle d'atac el valor de  $C_L$  cau en picat i per lo tan el perfil entra en pèrdua.

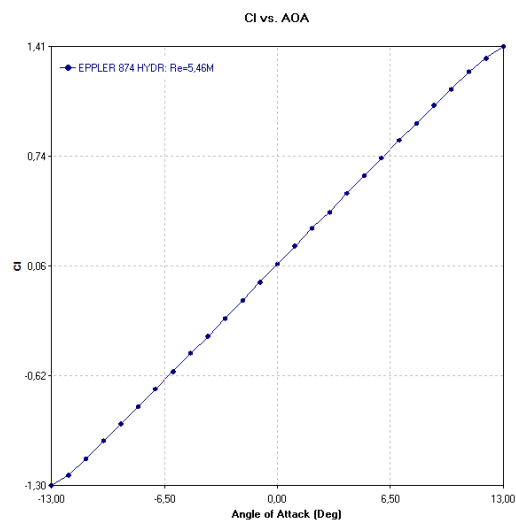


Fig. 4. 41 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 874 en funció de  $\alpha$

La gràfica del rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.42) d'aquest perfil presenta una zona estable que comprèn els angles d'atac entre els 6° i els 10°. El valor màxim del rendiment hidrodinàmic es troba als 7° i és  $\beta_{\text{màx.}}=102,408$ . Per altra banda a la Fig. 4.43 es pot observar com el  $C_m$  presenta una regressió molt marcada a mesura que augmentem l'angle d'atac.

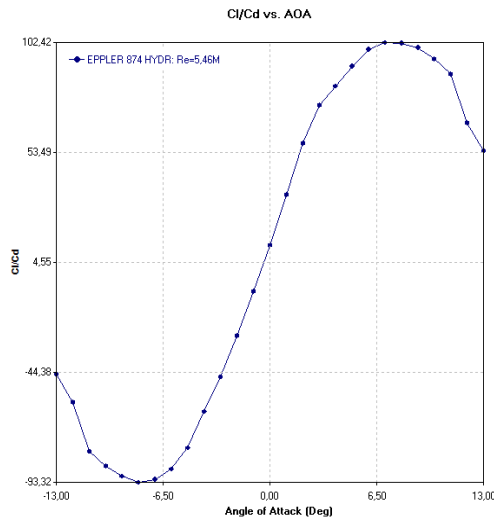


Fig. 4. 62 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 874 en funció de  $\alpha$

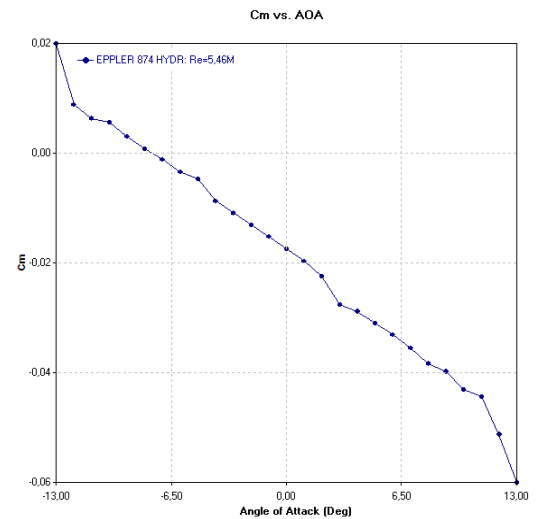


Fig. 4. 53 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 874 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.6 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
4°	0,5038	0,00606	-0,026	83,135	0,168
5°	0,6147	0,00669	-0,0282	91,883	0,257
6°	0,7254	0,0073	-0,0304	99,370	0,363
7°	0,8336	0,00814	-0,0329	102,408	0,486
8°	0,939	0,00919	-0,0359	102,176	0,626
9°	1,0491	0,01047	-0,0374	100,201	0,786
10°	1,1501	0,01209	-0,0408	95,128	0,956

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
<b>11°</b>	1,2583	0,01422	-0,0421	88,488	1,150
<b>12°</b>	1,3413	0,02013	-0,0493	66,632	1,335
<b>13</b>	1,415	0,02603	-0,0584	54,360	1,524

Taula 4. 6 Resultats de la simulació del perfil E874

Tal i com es pot observar en la taula no existeix en el rang d'angles estudiats cap valor de  $\lambda > 1$  i per tant no existeix suficient força de sustentació per elevar el casc per sobre del nivell del mar.

Per intentar que aquest perfil sigui adequat a l'aplicació que se l'hi volia donar, es podria intentar augmentar l'angle d'atac del perfil, però d'aquesta manera el rendiment del perfil empitjoraria i s'aproparia perillosament a l'angle d'entrada en pèrdua.

#### Perfil EPPLER 904 *HYDROFOIL* AIRFOIL

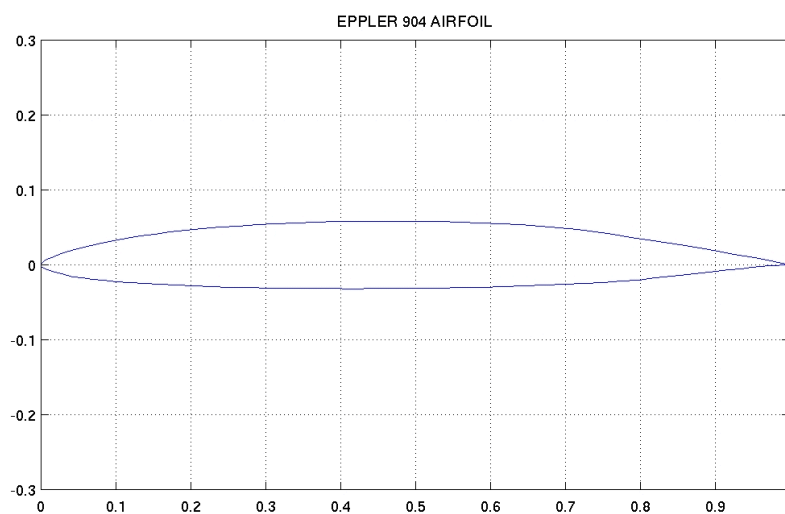


Fig. 4.44 Perfil Eppler 904

Analitzant la gràfica del coeficient de sustentació vers l'angle d'atac d'aquest perfil es veu com l'angle d'entrada en pèrdua és de  $9^\circ$  i que una vegada superat aquest valor entra en pèrdua bruscament. Aquest angle també representa l'angle on el perfil obté la major sustentació amb un coeficient de sustentació de 1,17.

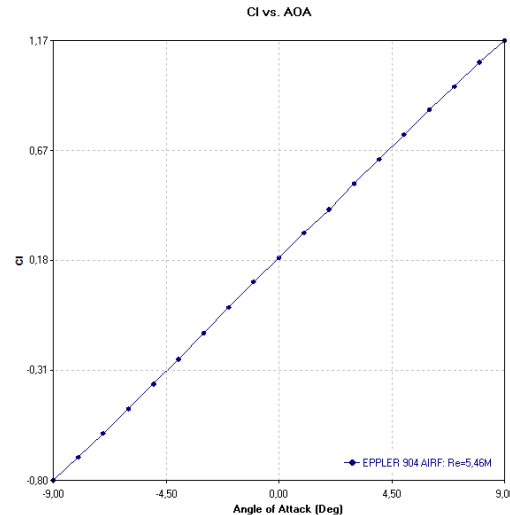


Fig. 4. 75 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 904 en funció de  $\alpha$

Per altra banda, la gràfica del rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.46) presenta un màxim als  $7^\circ$  ( $\beta_{m\grave{a}x.}=101,63$ ) en una zona on únicament els angles compresos entre els  $5^\circ$  i els  $8^\circ$  tenen un rendiment semblant. A la Fig. 4.47 es pot observar com el  $C_m$  presenta una regressió molt marcada a mesura que s'augmenta l'angle d'atac.

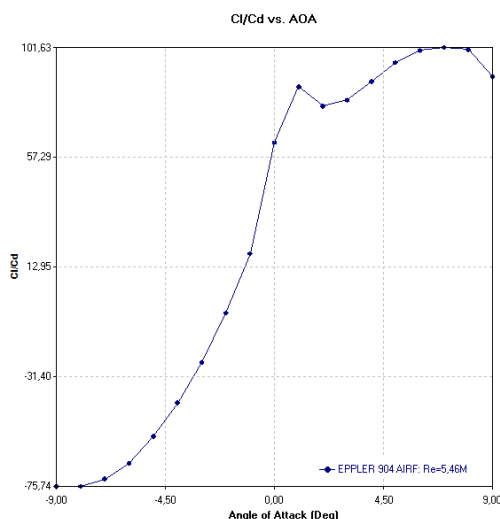


Fig. 4. 96 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 904 en funció de  $\alpha$

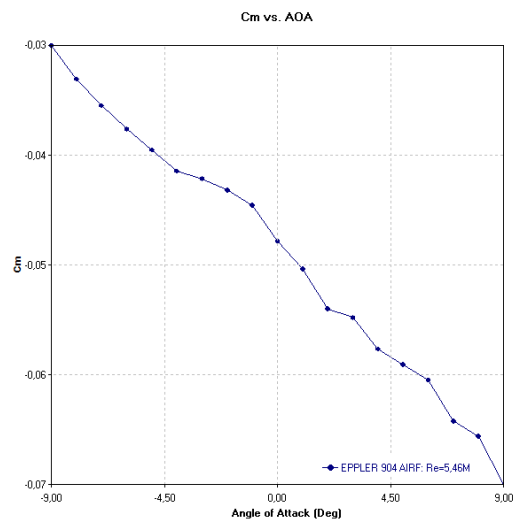


Fig. 4. 87 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 904 en funció de  $\alpha$

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
3°	0,5244	0,00652	-0,0516	80,429	0,131
4°	0,6321	0,0072	-0,0543	87,792	0,211
5°	0,7446	0,0078	-0,0556	95,462	0,311
6°	0,8564	0,00853	-0,0569	100,399	0,429
7°	0,9583	0,00943	-0,0604	101,622	0,559
8°	1,068	0,0106	-0,0617	100,755	0,712
9°	1,1653	0,01297	-0,0658	89,846	0,873

Taula 4. 7 Resultats de la simulació del perfil E904

En la taula es pot observar com els angles d'atac que presentaven un major rendiment no aconseguixen generar la suficient sustentació per aixecar la totalitat del casc de l'embarcació. Com a molt es podria navegar amb un 72% del pes del casc aixecat respecte el mar, reduint d'aquesta manera la força de fricció de l'aigua.

Finalment s'observa en el gràfic del coeficient de capcineig vers l'angle d'atac que el valor que presenta  $C_m$  al entrar en pèrdua és de -0,07.

### Perfil EPPLER 908 *HYDROFOIL* AIRFOIL

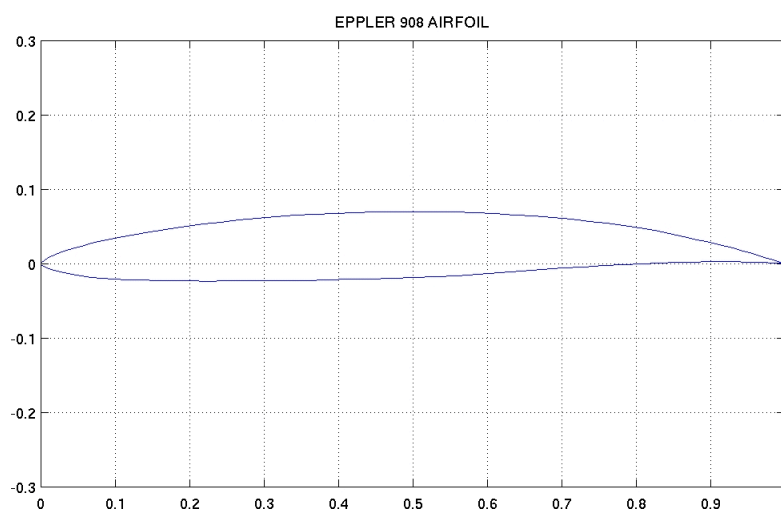


Fig. 4. 4810 Perfil Eppler 908



El diagrama del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.49) mostra una sustentació màxima per un angle d'atac de  $7^\circ$  ( $C_{L\text{màx.}}=1,23$ ) i com en el cas del perfil anterior, entra en pèrdua de manera brusca una vegada es supera aquest valor.

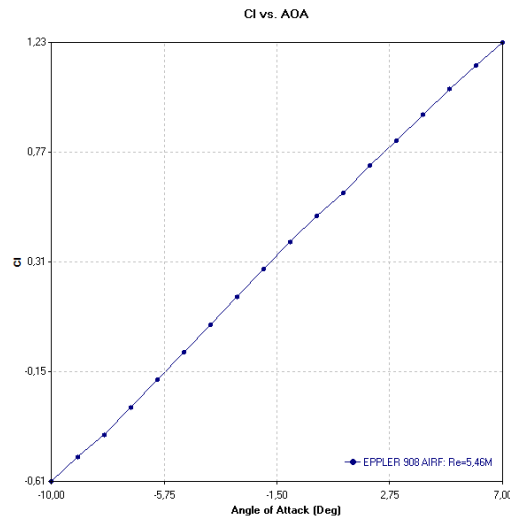


Fig. 4. 119 Gràfica del coeficient de sustentació d'un perfil Eppler 908 en funció de  $\alpha$

Es pot observar com en la gràfica del rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.50) existeix un pic als  $0^\circ$  amb un rendiment de ( $\beta_{\text{màx.}}=147,47$ ), de totes maneres s'ha considerat més adequat estudiar la zona on es troba rendiments elevats i semblants, ja que representa una zona de més estabilitat. Aquesta zona comprèn des dels  $4^\circ$  fins als  $6^\circ$  amb un rendiment màxim en aquesta zona de 114,79. A la Fig. 4.51 es pot observar com el  $C_m$  presenta una regressió molt marcada a mesura que s'augmenta l'angle d'atac.

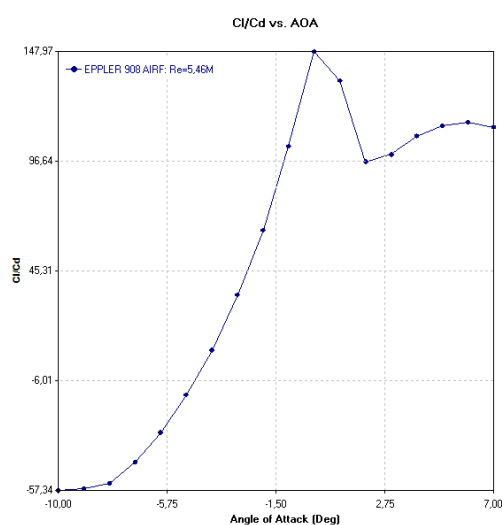


Fig. 4. 50 Gràfica del rendiment hidrodinàmic d'un perfil Eppler 908 en funció de  $\alpha$

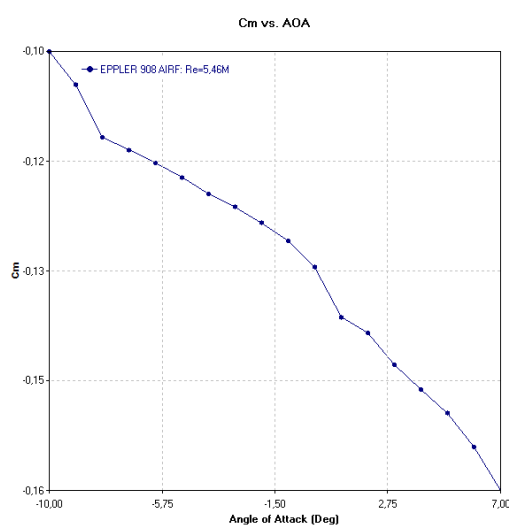


Fig. 4. 51 Gràfica del coeficient de capcineig d'un perfil Eppler 817 en funció de  $\alpha$

En la taula 4.8 es pot observar els resultats més rellevants obtinguts en la simulació d'aquest perfil.

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$	$\beta (C_L/C_M)$	$\lambda$
2°	0,7106	0,00737	-0,1389	96,418	0,119
3°	0,8155	0,00817	-0,1432	99,816	0,204
4°	0,9235	0,00852	-0,1465	108,392	0,308
5°	1,031	0,00911	-0,1497	113,172	0,430
6°	1,1319	0,00986	-0,1543	114,797	0,566
7°	1,2265	0,0109	-0,1602	112,523	0,716

Taula 4. 8 Resultats de la simulació del perfil E908

Tal i com s'observa en la taula no existeix cap angle d'atac per el qual aquest perfil pugui generar la suficient sustentació per elevar el casc per sobre del nivell del mar. Com en el cas anterior, l'únic que es podria plantejar és elevar un tant per cent el pes del casc sobre l'aigua reduint la força de fricció i d'aquesta manera es necessitaria menys energia per propulsar l'embarcació.

A partir de les dades numèriques i gràfiques obtingudes en el apartat anterior s'ha realitzat una taula comparativa. En la taula 4.9 s'observa el rang d'angles d'atac  $[\alpha_1, \alpha_2]$  en el qual es considera que el perfil és estable, la seva variació en aquest rang ( $\Delta\alpha_{1,2}$ ), així com l'angle d'atac on s'obté el rendiment hidrodinàmic màxim ( $\alpha_{\beta_{\max}}$ ) i el valor d'aquest rendiment hidrodinàmic ( $\beta_{\max}$ ). També s'hi incorpora el rang d'angles d'atac  $[\alpha_A, \alpha_B]$  per el qual el perfil genera la força de sustentació suficient com per aixecar l'embarcació ( $\lambda > 1$ ) i la variació que existeix en aquest rang ( $\Delta\alpha_{A,B}$ ). Per últim l'angle on el perfil entra en pèrdua ( $\alpha_P$ ), com succeeix aquest fet i si presenta un coeficient de capcineig favorable.

Perfil	$[\alpha_1, \alpha_2]$	$\Delta\alpha_{1,2}$	$\alpha_{\beta_{\max}}$	$\beta_{\max}$	$[\alpha_A, \alpha_B]$ ( $\lambda > 1$ )	$\Delta\alpha_{A,B}$	$\alpha_P$	Entrada en pèrdua	$C_M$
E817	$[3^\circ, 10^\circ]$	$7^\circ$	$7^\circ$	113,06	$[9^\circ, 10^\circ]$	$2^\circ$	$17^\circ$	SUAU	NO
E818	$[4^\circ, 8^\circ]$	$4^\circ$	$7^\circ$	118,22	$\emptyset$	$\emptyset$	$11^\circ$	BRUSCA	NO
E836	$[6^\circ, 12^\circ]$	$6^\circ$	$9^\circ$	91,62	$[11^\circ, 12^\circ]$	$2^\circ$	$16^\circ$	SUAU	SÍ
E837	$[6^\circ, 12^\circ]$	$6^\circ$	$7^\circ$	88,03	$[11^\circ, 12^\circ]$	$2^\circ$	$15^\circ$	SUAU	SÍ
E838	$[4^\circ, 12^\circ]$	$8^\circ$	$4^\circ$	84,47	$[11^\circ, 12^\circ]$	$2^\circ$	$16^\circ$	SUAU	SÍ
E874	$[6^\circ, 10^\circ]$	$4^\circ$	$7^\circ$	102,408	$\emptyset$	$\emptyset$	$13^\circ$	BRUSCA	NO
E904	$[5^\circ, 8^\circ]$	$3^\circ$	$7^\circ$	101,63	$\emptyset$	$\emptyset$	$9^\circ$	BRUSCA	SÍ
E908	$[4^\circ, 6^\circ]$	$3^\circ$	$6^\circ$	114,79	$\emptyset$	$\emptyset$	$7^\circ$	BRUSCA	NO

Taula 4. 9 Comparativa dels resultats dels perfils

#### 4.4.3. Comparativa dels perfils

Un cop analitzats els diferents paràmetres mitjançant el programari de simulació VisualFoil 5.0, determinat el rang d'angles d'atac d'estudi i els paràmetres que es volen tenir en compte, es realitza una primera comparativa.

En aquest procés de comparativa es classifica els paràmetres d'estudi segons el valor d'importància segons el nostre criteri que aquests tenen en la selecció del perfil òptim.

Dins d'aquesta comparativa tenint en compte que es tracta d'un perfil sustentador, es considera que un dels factors més importants a l'hora de seleccionar un perfil, és la capacitat que té el perfil per sustentar l'embarcació en les condicions establertes.

D'aquesta manera s'ha realitzat un primer filtre dins dels diferents perfils seleccionats. És a dir els perfils E904 i E908 queden directament descartats degut a que en les condicions establertes no compleixen el criteri de sustentació de una embarcació AC45.

D'altra banda analitzant el comportament de la regressió de la gràfica de  $C_L$  s'observa com els perfils E818 i E874 tenen una entrada en pèrdua brusca i els E836, E837, E838 i E817 tenen una entrada en pèrdua més suau.

Tan mateix els perfils E818 i E874 atenyen la entrada en pèrdua per valors d'angle força més baixos que els perfils restants. D'aquesta manera és més probable que per factor d'onatge o de capcineig aquests entrin fàcilment en pèrdua. A més a més es veu com a la taula 4.9 aquests dos perfils no compleixen el caràcter sustentador necessari per aixecar l'embarcació en el rang d'angles d'estudi establert. És per això que descartem els perfils E818 i E874 com a possibles perfils òptims per aquesta embarcació.

Segons els resultats obtinguts a la taula 4.9 es pot dir que com els quatre perfils restants semblen ser igual de beneficiaris per l'embarcació. És per això, que a continuació es realitza una comparativa gràfica dels quatre perfils.

**$C_L/C_D$  vs  $\alpha$  :**

Analitzant el diagrama del rendiment hidrodinàmic (Fig. 4.52) es veu que el perfil E817 mostra un rendiment superior als altres perfils en la zona estable, així com un rang de valors d' $\alpha$  més ampli.

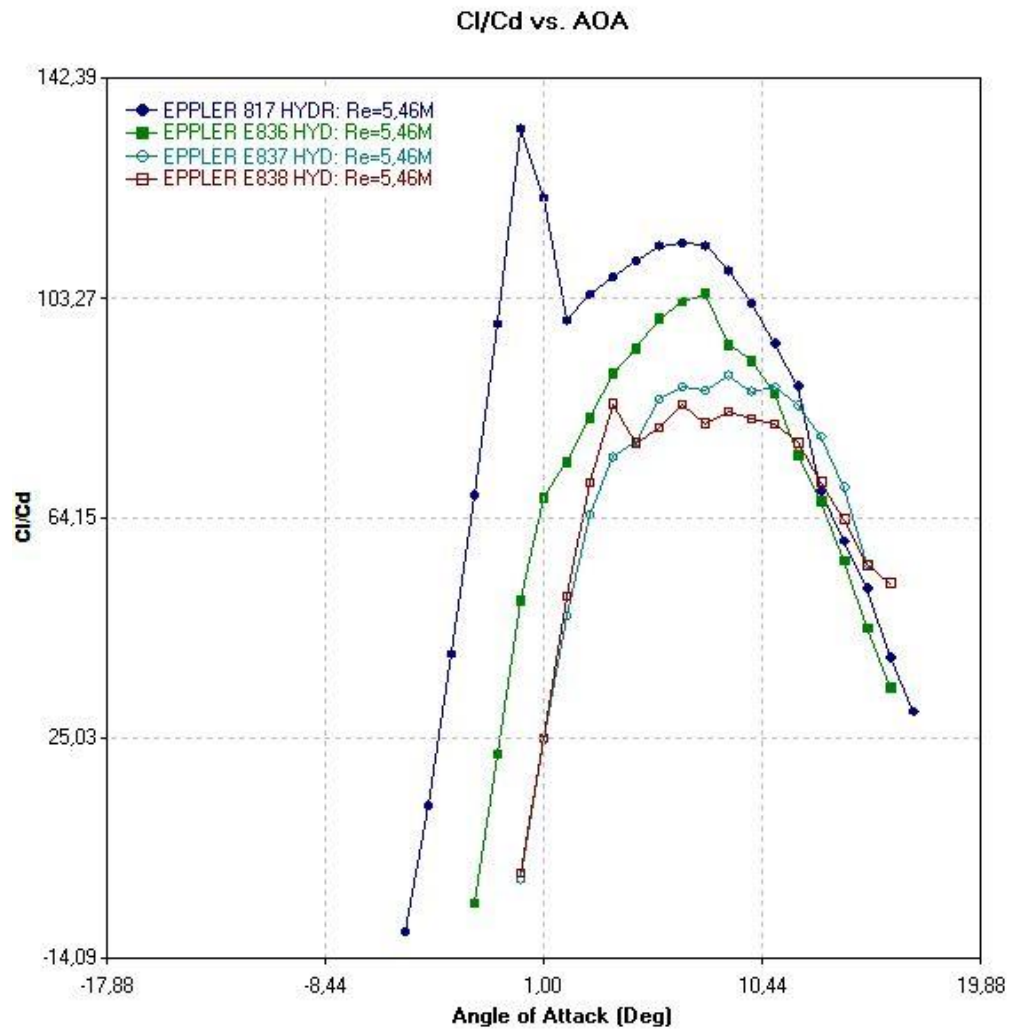


Fig. 4. 5212 Gràfica comparativa de la zona de màxim rendiment hidrodinàmic dels perfils E817, E836,E837,E838

Observant el rang de valors per els quals el perfil sustenta l'embarcació ( $\lambda > 1$ ), es pot apreciar que per aquest valors la diferencia del rendiment hidrodinàmic no és tan gran.

Per altre banda es pot observar com el rendiment dels perfils E837 i E838 són molt semblants i uniformes en tota la seva zona estable, a diferencia dels perfils E817 i E836 que presenten una distribució còncaua. En la Fig. 4.53 es pot apreciar un zoom de la zona estable.

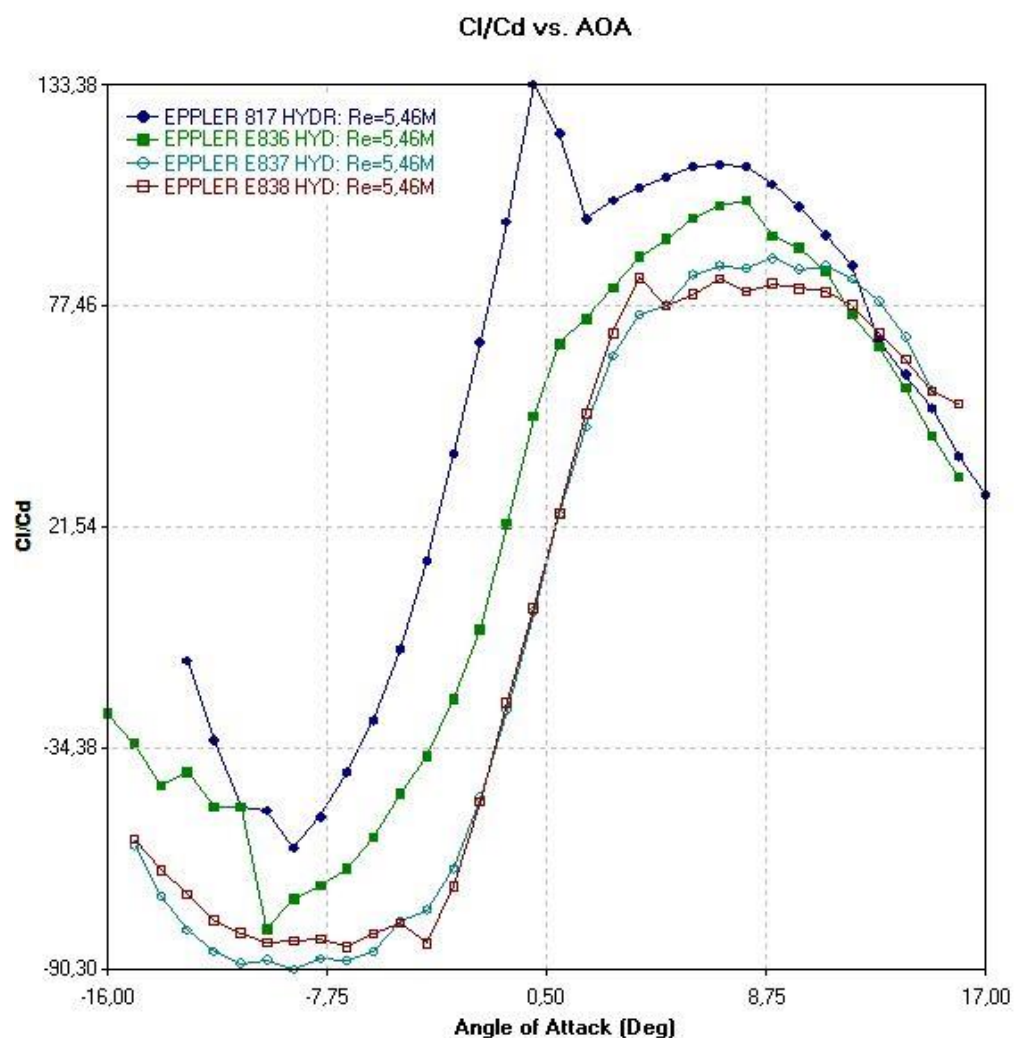


Fig. 4.53 Gràfica comparativa del coeficient hidrodinàmic en funció de l'angle d'atac dels perfils E817, E836, E837, E838

**$C_L$  vs  $\alpha$  :**

S'aprecia en la gràfica comparativa del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac (Fig. 4.54) que el perfil E817 presenta uns valors de sustentació més elevats que els altres per tots els seus angles d'atac.

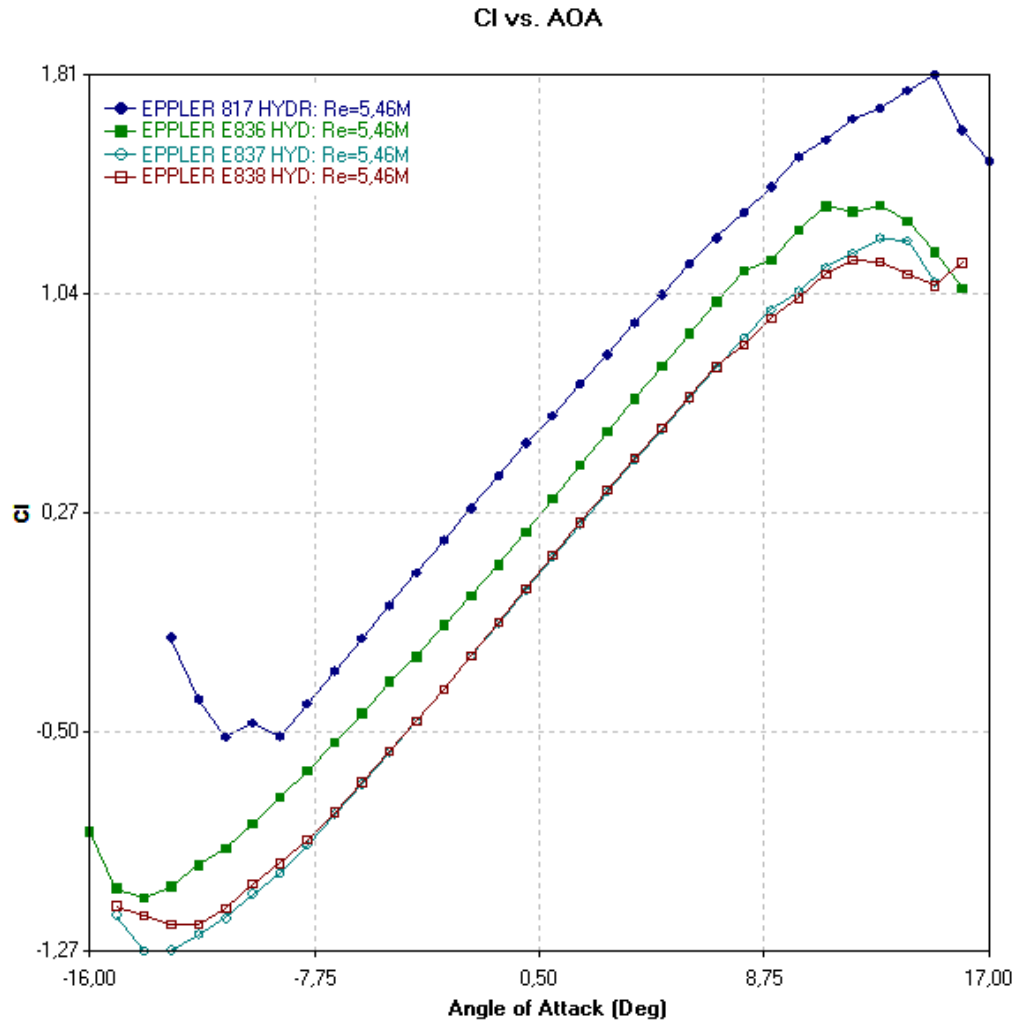


Fig. 4. 5413 Gràfica comparativa del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac per els perfils E817, E836, E837, E838

De totes maneres si es realitza un zoom a la zona de màxima sustentació i zona d'entrada en pèrdua, es pot observar en la gràfica com l'entrada en pèrdua dels perfil E817 i E837 és molt més forta que la dels perfils E836 i E838 que tenen una entrada en pèrdua més suau i per lo tant més fàcil de controlar.

**$C_m$  vs  $\alpha$  :**

Analitzant la gràfica del moment de capcineig (Fig. 4.55) es veu com els perfils E836, E837 i E838 presenten uns valors al voltant del  $0^\circ$  i una variació del coeficient molt petita, fet que afavoreix a la seguretat de l'embarcació, mentre que el perfil E817 presenta un coeficient molt elevat i per tan menys estable per l'embarcació.

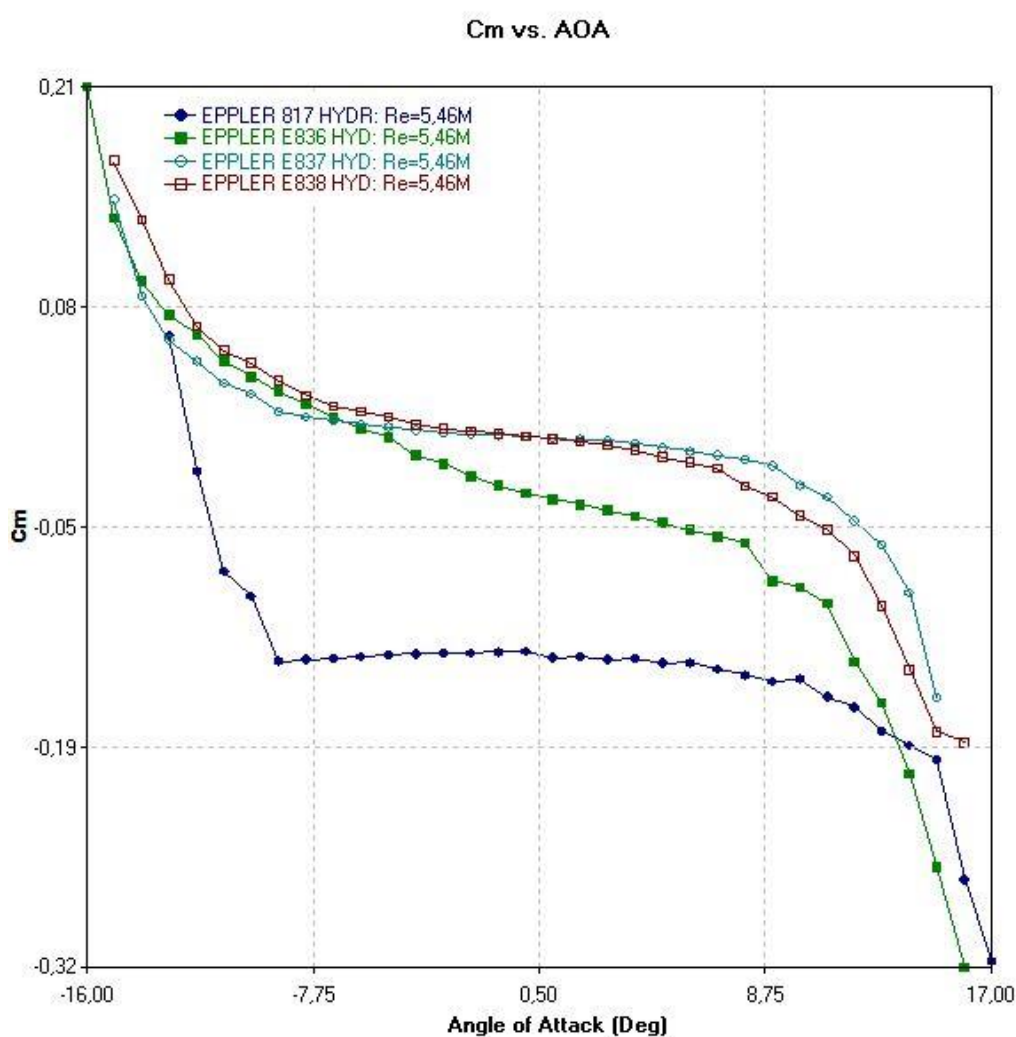


Fig. 4.55 Gràfica comparativa del moment de capcineig en funció de l'angle d'atac per els perfil E817, E836, E837, E838

Per altra banda és interessant obtenir valors de  $C_m$  elevats una vegada el perfil arriba a la zona d'entrada en pèrdua, i en aquest cas el perfil que ens aporta més és el E836.



**$\lambda$  vs  $\alpha$  :**

A continuació s'ha desenvolupat el gràfic (Fig.4.56) mitjançant les Taules (4.1 - 4.8) per tal d'observar els valors de  $\lambda$  que s'obtenen per els diferents perfils segons el seu angle d'atac.

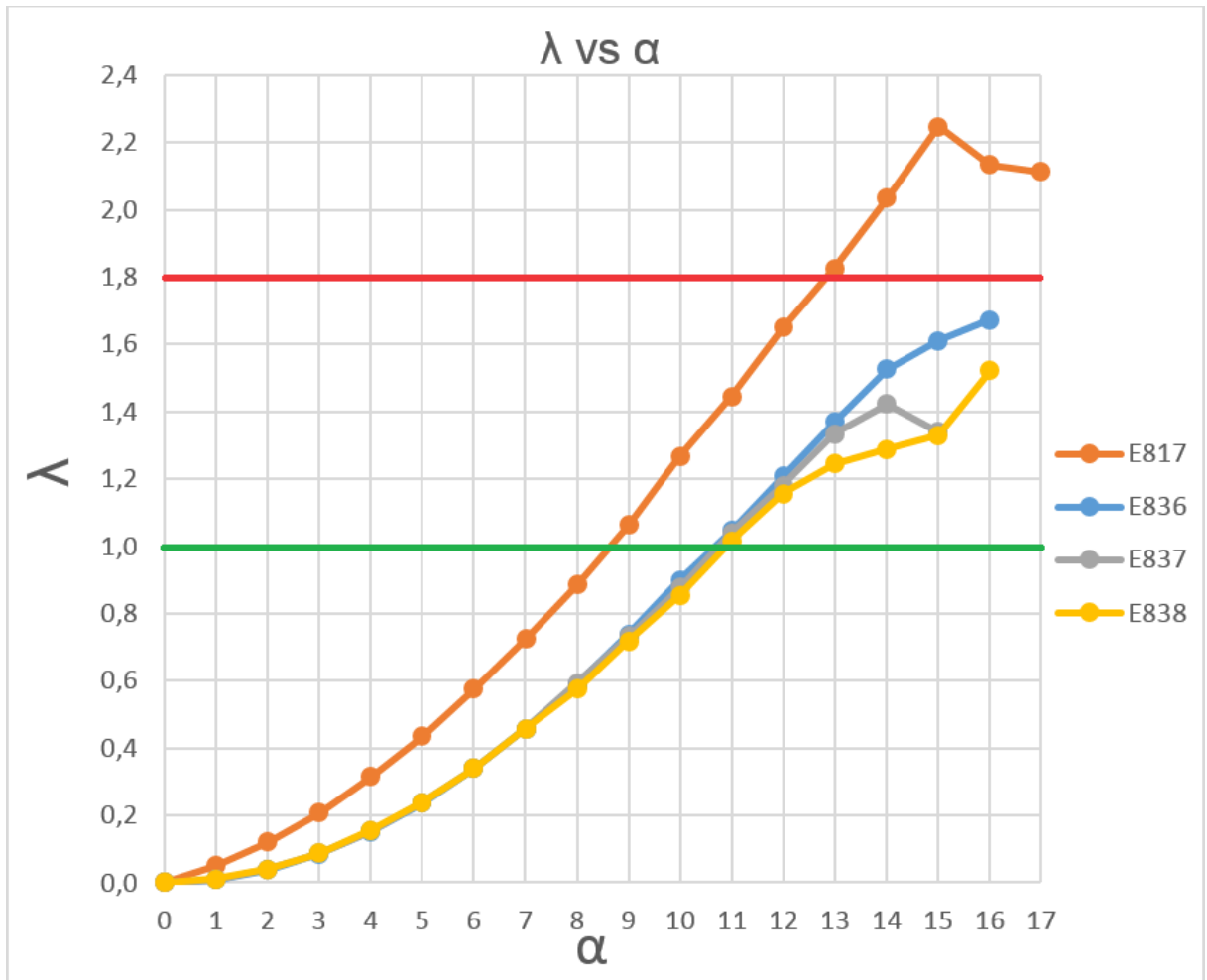


Fig. 4. 14 Gràfica comparativa de el tant per u de sustentació - $\lambda$ - de l'embarcació en funció del angle d'atac dels perfils E817, E836, E837, E838

En el diagrama es pot remarcar com el perfil E817 és el que ens genera valors de  $\lambda > 1$  per un rang d'angles més gran, així com valors més elevats que la resta de perfils. Això no vol dir que aquest perfil sigui el més adient necessàriament, ja que obtenir valors de  $\lambda$  molt elevats pot generar que s'enlairi l'embarcació excessivament. I conseqüentment generar una inestabilitat que provoqui que la navegació no sigui segura sobretot en maniobres de viratge.

#### 4.4.4. Selecció perfil òptim

A continuació es desenvolupa la presa de decisió del perfil seleccionat segons les comparatives i valors obtinguts en els apartats anteriors:

- En primer lloc, s'ha observat en el gràfic que el perfil que aporta un rendiment hidrodinàmic major és el perfil E817. Tot i així, s'ha mencionat que en la zona d'angles d'atac on interessa que treballi el nostre perfil, la diferencia no és tan elevada. A més a més, els valors obtinguts per els altres perfils es consideren força bons, ja que un rendiment per sobre dels 80 a la zona d'estabilitat i de treball és suficient per les necessitats de la embarcació.
- En segon lloc, s'ha remarcat en el gràfic que el  $C_L$  més gran es troba en el perfil del E817, però que la seva entrada en pèrdua era molt més agressiva que els perfils E836 i E838. En aquest cas, es considera millor obtenir una entrada en pèrdua més controlada i segura encara que això impliqui renunciar a un coeficient de sustentació més elevat.
- Pel que fa al coeficient de capcineig interessa trobar un valor que al voltant dels  $0^\circ$  no variés gaire i que el seu valor fos negatiu i el més pròxim al zero. Com s'ha pogut observar en el gràfic els perfils E836, E837 i E838 compleixen aquests requisits a la perfecció, mentre que el perfil E817 presenta una variació molt petita al voltant dels  $0^\circ$  però un valor elevat.
- Per últim s'ha realitzat una gràfica comparativa ( $\lambda$  vs  $\alpha$ ) que permet avaluar per a quin rang de valors d' $\alpha$  els diferents perfils aixequen l'embarcació i amb quina intensitat ho fan. D'aquest gràfic s'ha pogut observar que el que aixeca en un major rang d'angles l'embarcació era el perfil E817, però també hem observat que ho feia amb una intensitat massa elevada. Aquest fet pot ser perillós per la seguretat de l'embarcació ja que un excés de força de sustentació pot elevar l'embarcació i que els *hydrofoils* es situïn al nivell de la superfície del mar momentàniament augmentant la inestabilitat, podent generar un moment de picat de la proa de l'embarcació. El segon perfil que aporta el millor rang d'angles d'atac de sustentació ha sigut el E836, en aquest cas els valors de  $\lambda$  en cap moment sobrepassaven els valors considerats perillosos ( $\lambda > 1,8$ ).

Segons els criteris comentats anteriorment, s'han descartat en primer lloc els perfils E837 i E838, degut a que els dos altres perfils aporten millors prestacions en pràcticament tots els paràmetres estudiats.

Finalment s'ha decidit escollir el perfil E836 ja que es considera que aporta exactament les necessitats de l'embarcació, mentre que el perfil E817, tot i generar més sustentació i major rang d'angles d'atac es considera menys estable i potser excessivament potent per els nostres requeriments.



## 5. Simulació CFD

### 5.1. Que és el CFD?

La Fluidodinàmica computacional o CFD, és una rama de la mecànica de fluids que es basa en la resolució mitjançant mètodes numèrics de les equacions de Navier-Stokes que governen el flux d'un fluid, amb la finalitat de poder aplicar-les a problemes reals i d'utilitat pràctica.

Les etapes que formen el procés de simulació són les següents:

- **PREPROCÉS:** Definir el problema.
  - Domini computacional: Es defineix la geometria del problema.
  - Discretització: El volum ocupat per el fluid es divideix en cel·les discretes, el resultat d'aquestes és un mallat que pot ser uniforme o no.
  - Propietats del fluid.
  - Assignació de les condicions de contorn i/o condicions inicials.
- **RESOLUCIÓ:** Generació de la solució del sistema mitjançant les equacions de la mecànica de fluids computacional, durant reiterades iteracions.
- **POSTPROCÉS:** Visualització i anàlisi dels resultats amb l'objectiu de validar el comportament del fluid i obtenir conclusions respecte a la seva fiabilitat o identificació de possibles errors realitzats .

### 5.2. Desenvolupament de la simulació en 2D

Per realitzar la simulació es segueixen els passos descrits anteriorment (Ap.5.1). [Es pot trobar més informació en el annex B.]

#### 5.2.1. Plantejament del problema

Simulació del perfil E836 a nivell fuidodinàmic. Es vol observar el moviment de l'aigua al voltant del perfil així com la seva velocitat i les pressions que existeixen.

Es tracta d'una simulació monofàsica ja que únicament s'estudiarà la situació en la que tot el perfil es troba submergit.

### 5.2.2. Generació de la geometria 2D.

Per realitzar una simulació d'aquest caire és necessari generar una superfície de control al voltant del perfil per tal de assignar-li més tard les condicions de contorn. Com s'aprecia en la Fig. C.3. s'han realitzat dos superfícies al voltant del perfil, per realitzar un diferent mallat que s'explica més endavant.

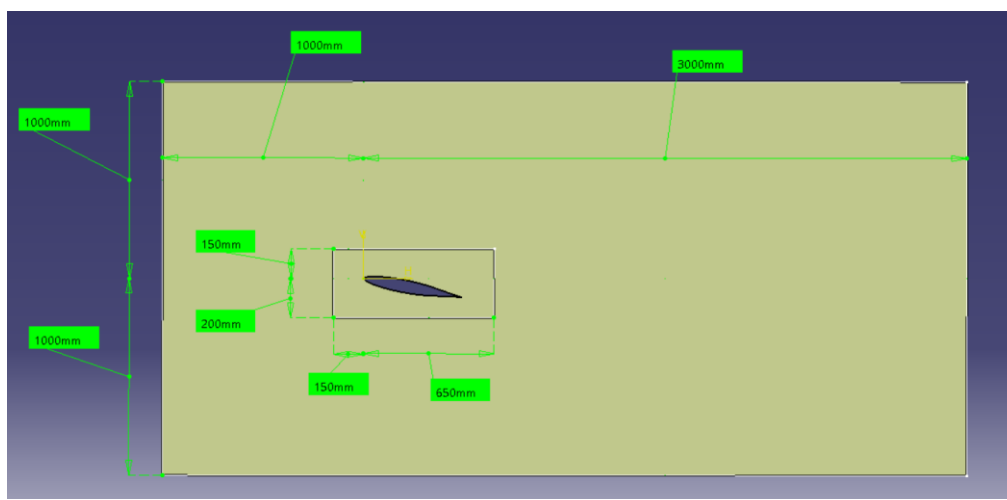


Fig. C. 1. Dimensions del volum de control en CATIA V5

Finalment s'importa aquest arxiu al ANSYS 15.0 i es nomenen els elements de la superfície que representen l'entrada del fluid (inlet), la sortida del fluid (outlet), el perfil (E836), les parets lliures (Wall), la caixa interior que envolta el perfil d'estudi (ProfileBox), les seves limitacions (ContinuityBox) i la caixa que completa la superfície de control (Box). A continuació es mostra en la Fig. C.2 tots els elements de la superfície esmentats.

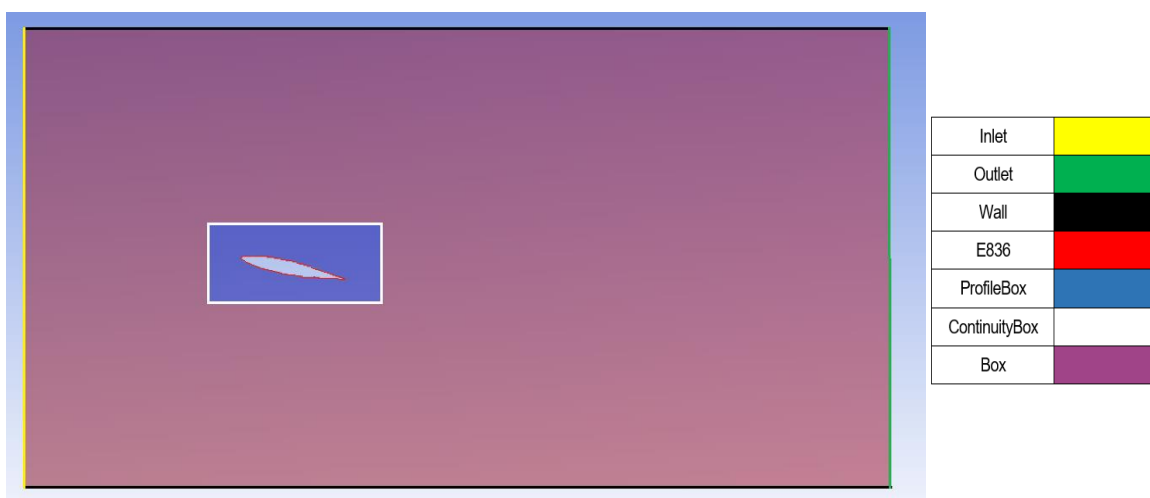


Fig. C. 2. Elements de la superfície de control

### 5.2.3. Obtenció de la malla

Es realitza un mallat de la superfície mitjançant tres controls de mallat:

- Definint un valor estipulat per la grandària de la malla en les diferents superfícies (conjunt general i box).
- Definint que la malla estigui formada únicament per triangles en tot el conjunt.
- S'ha realitzat un *refinement* al voltant de la superfície del perfil de manera que s'obté un mallat més precís en aquesta zona i més adequat per la simulació.

La malla obtinguda és la que es pot observar en la Fig. C.3 següent:

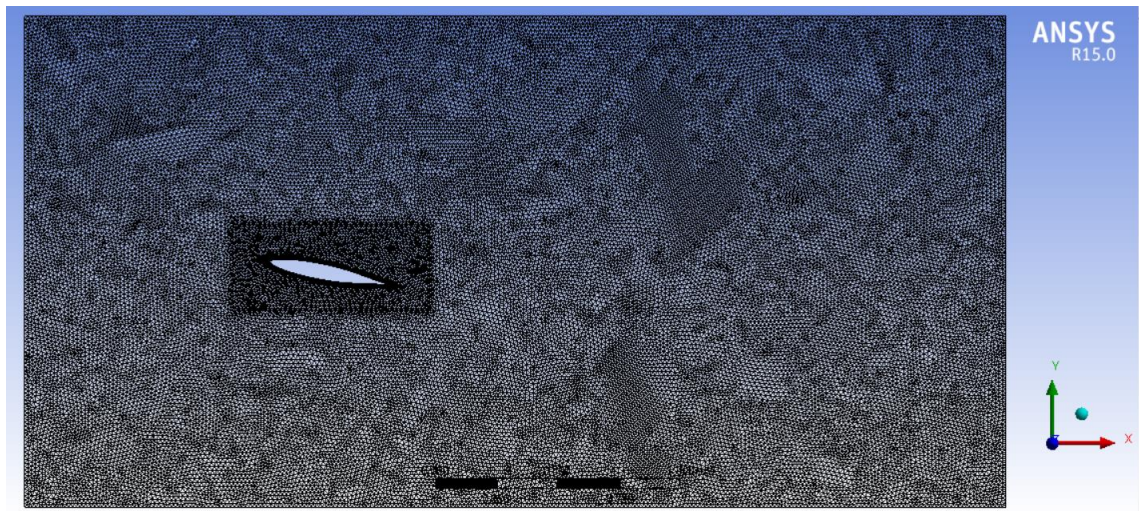


Fig. C. 3. Mallat de la superfície de control del E836

### 5.3. Introducció de les condicions

Per la realització del estudi s'ha utilitzat el model  $k-\omega$  SST que ens permet realitzar un estudi precís ja sigui un flux laminar o turbulent.

Les condicions que s'han inicialitzat per realitzar la simulació es poden observar en la taula 5.1.

Zona	Tipo	Fase	Valor
Inlet	Velocity-Inlet	Mixture	Velocity = 12,86 m/s Turbulent Intensity = 5% Turbulent Viscosity Ratio = 10
Outlet	Pressure-Outlet	Mixture	Pressure: 15100 Pa
E836	Wall	Mixture	-
Wall	Wall	Mixture	Shear Condition: Specified Shear

Taula 5. 1 Condicions de contorn de la superfície

Es pot veure de manera més detallada com s'ha realitzat la simulació a l'annex C.



## 5.4. Anàlisi i interpretació de les solucions 2D

A continuació s'ha analitzat diverses gràfiques obtingudes mitjançant l'ANSYS 15.0 per tal d'interpretar els resultats obtinguts.

En primer lloc es pot veure en la Fig. 5.1 la posició en el perfil dels punts següents:

- Punt d'estancament: Punt en el perfil on la velocitat del fluid és 0.
- Punt de separació: Punt on la capa límit es desprèn del perfil.
- Punt de transició: Punt on succeeix la transició de capa límit laminar a capa límit turbulenta.

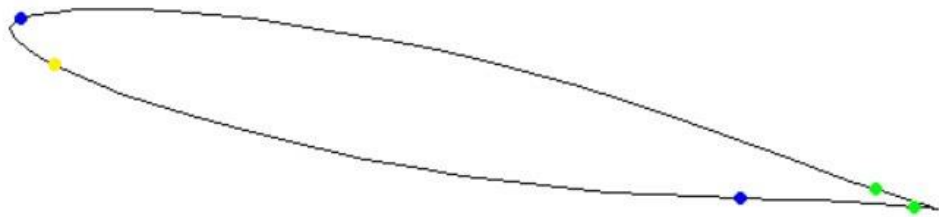


Fig. 5.1. Perfil E836 amb el punt d'estancament (groc), punts de separació de la capa límit (verd) i punts de transició (blau)

En la Fig. 5.1 s'observa a l'extradós com el punt de transició de capa límit laminar a capa límit turbulenta està en una posició molt avançada i propera al caire d'atac. Mentre que el punt de separació de la capa límit es troba molt proper al caire de sortida.

A l'intradós es veu que el punt de transició està molt més enrederit i proper al caire de sortida. També s'observa el punt d'estancament prop del caire d'atac.

### 5.4.1. Anàlisi de les línies de corrent

Mitjançant les línies de corrent que es mostren a la Fig. 5.2 es veu la direcció de les partícules al voltant del perfil. Com es pot observar existeix una línia de corrent que va a parar al punt d'estancament ( $u = 0$  m/s) i marca la separació de les línies que viatjaran per l'extradós i les línies que viatjaran per l'intradós.

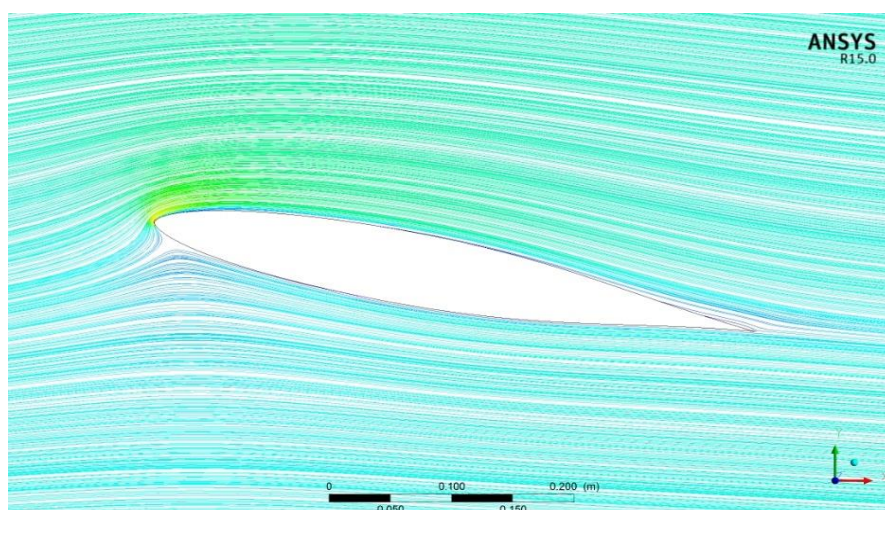


Fig. 5.2. Diagrama de velocitats amb línies de corrent

Com ja s'ha comentat, a continuació s'observa a la Fig. 5.3 la separació de les línies de corrent que viatgen per l'extradós i per l'intradós, marcant on es troba el punt d'estancament.

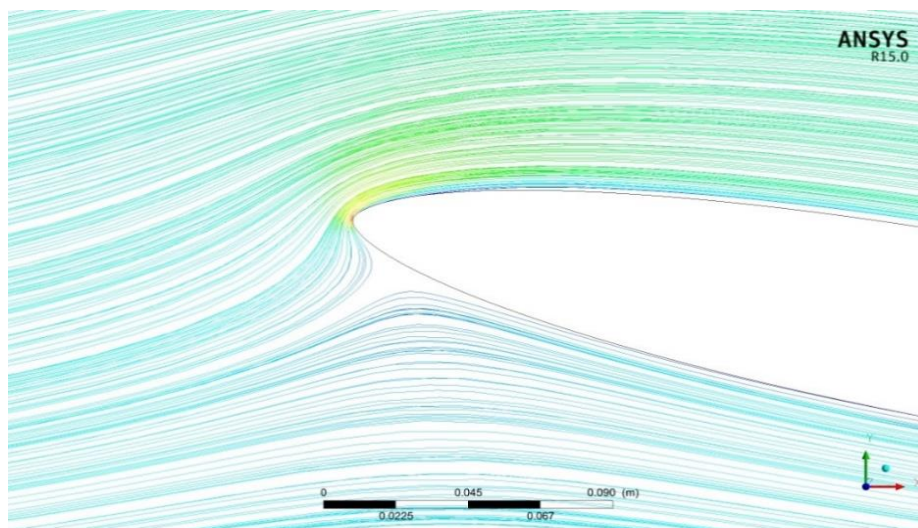


Fig. 5.3. Separació de les línies de corrent per l'extradós i l'intradós

### 5.4.2. Anàlisi de les velocitats

A la Fig. 5.4 es pot veure la distribució de velocitats entorn el perfil, en aquest cas s'observa com les velocitats a l'extradós són superiors a les del intradós. Tot i que la velocitat en els punts més propers al perfil és més baixa degut a la força de fricció existent entre el perfil i l'aigua. La velocitat d'entrada del sistema és de 12,86 m/s.

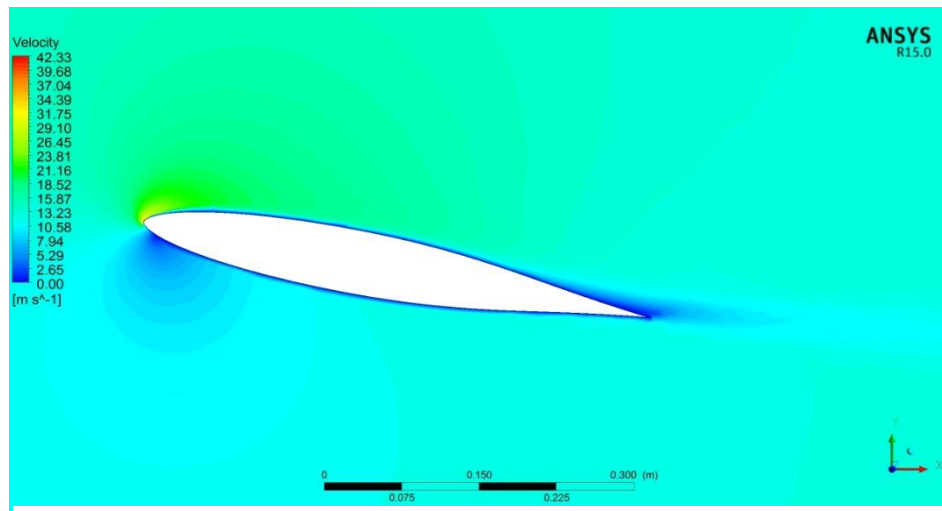


Fig. 5. 4. Diagrama de velocitats

La Fig.5.5 mostra com el valor màxim es troba una vegada superem el caire d'atac en la part de l'extradós, mentre que la velocitat mínima es situa en aquell punt on el fluid incideix perpendicularment amb el perfil, aquest és el punt d'estancament ( $u = 0$  m/s).

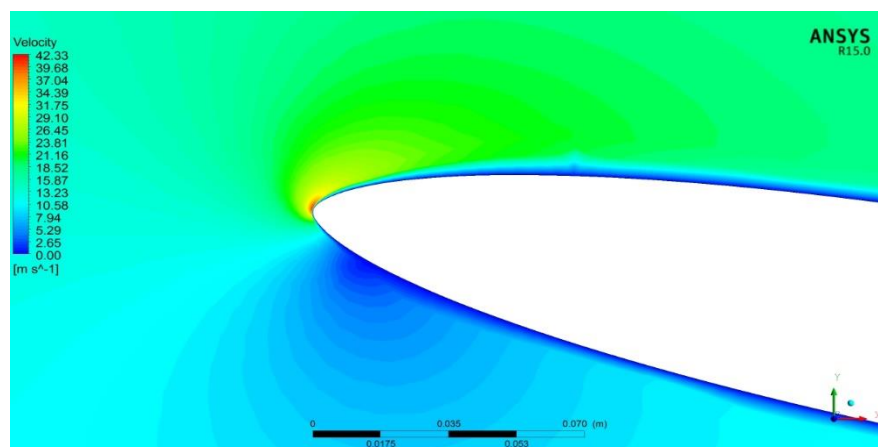


Fig. 5.5. Velocitats mínimes i màximes

A continuació es mostra els dos límits mencionats anteriorment:

$$u_{\text{màx.}} = 42,33 \text{ m/s}$$

$$u_{\text{min.}} = 0 \text{ m/s}$$

En la distribució dels vectors de velocitats (Fig. 5.6) es pot observar com en el caire d'atac tenim una forta tangència vertical de les partícules que passen per l'extradós amb velocitats màximes. S'observa com aquests s'ordenen a mesura que recorren el perfil, passant d'una capa límit laminar a la capa límit turbulenta (Fig. 5.7), per finalment molt a prop del caire de sortida observar com es desprèn la capa límit.

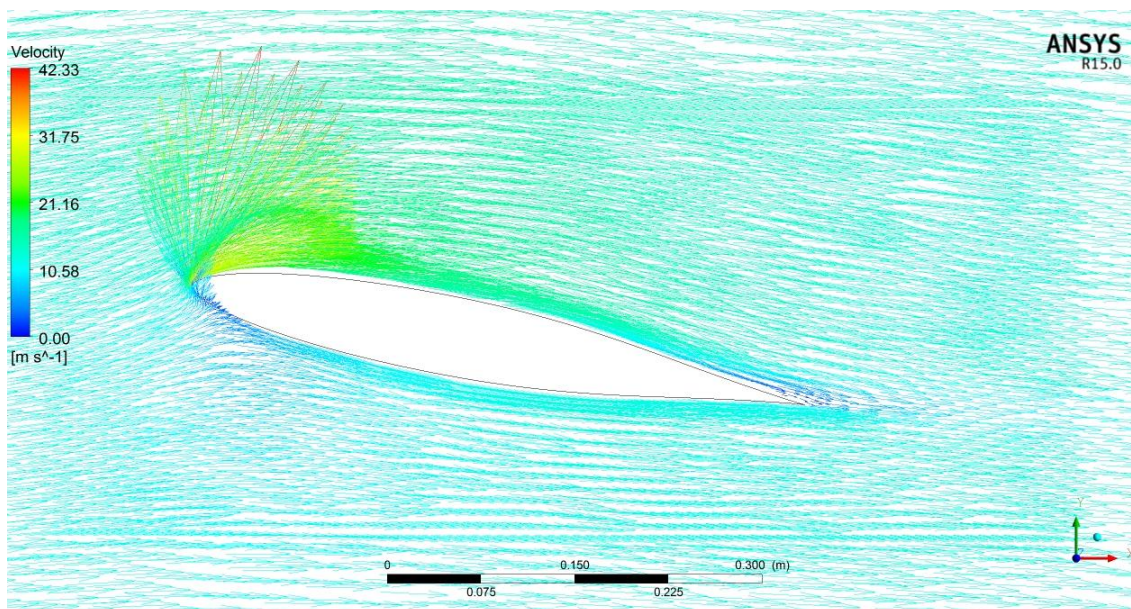


Fig. 5.6. Diagrama de la distribució vectorial de la velocitat

En la Fig 5.7 de nou es pot observar com els vectors normals a la superfície corresponen a les partícules que xoquen amb la superfície, és a dir que acaben amb velocitat nul·la en la superfície. Aquest punt com ja s'ha esmentat és el punt d'estancament.



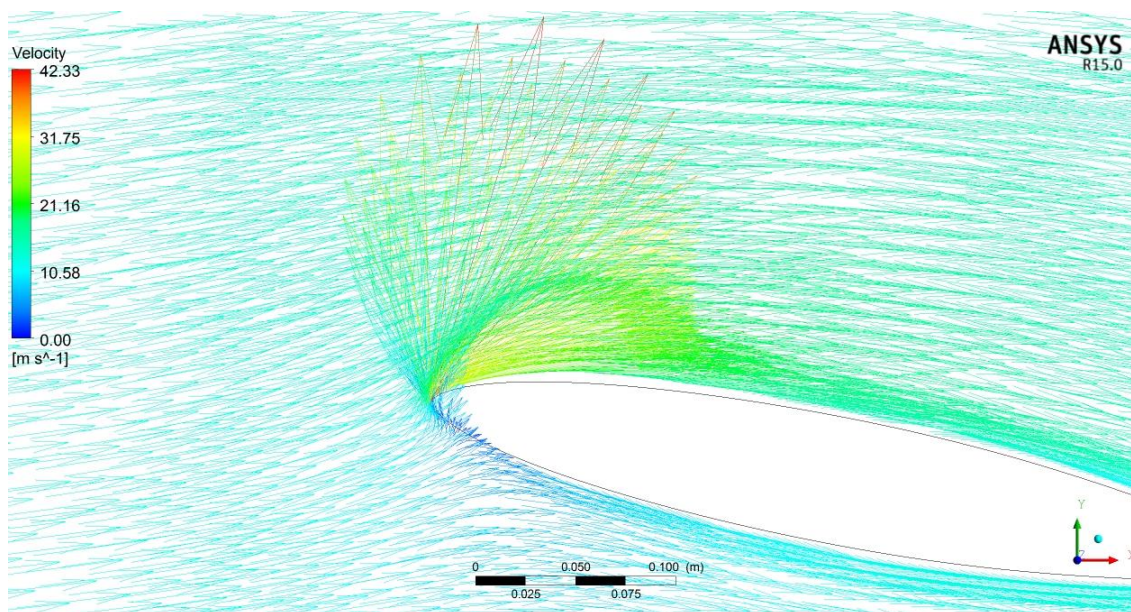


Fig. 5.7 Punt d'estancament i de velocitat màxima

En la Fig. 5.8 es veu en el caire de sortida com alguns vectors tendeixen a desordenar-se i la velocitat de les partícules baixa fortament. Aquest fet és degut a la separació de la capa límit del perfil degut a un gradient de pressions advers com hem explicat en l'apartat 4.3.2.

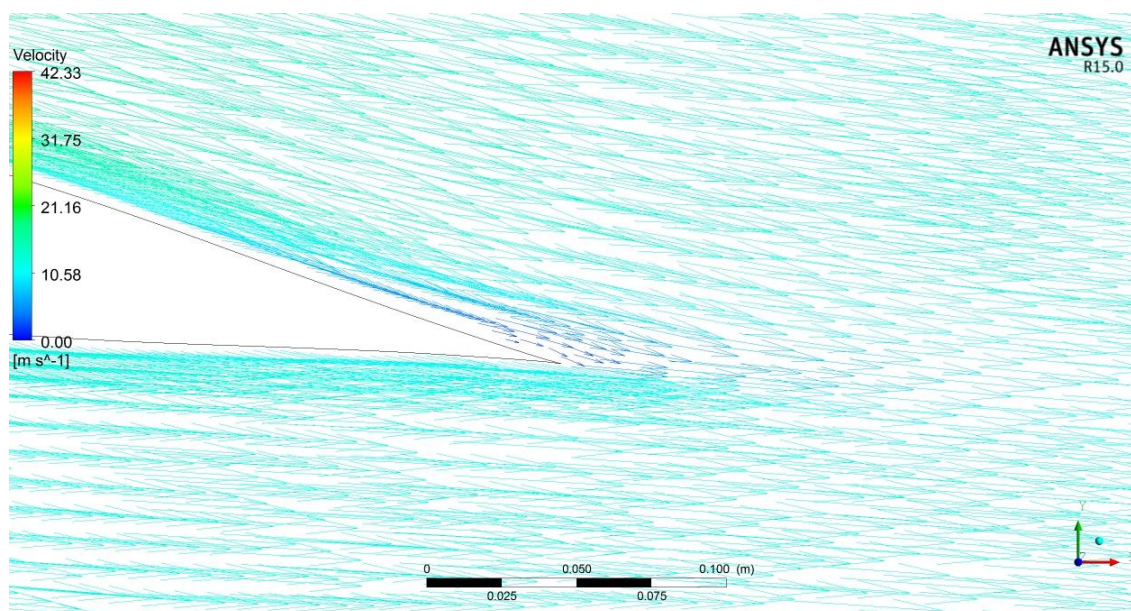


Fig. 5.8 Separació de la capa límit del perfil

Observant el diagrama que representa la component vertical de la velocitat (Fig 5.9) es pot veure al voltant del perfil prop del caire d'entrada com aquestes són petites. Aquestes velocitats en -y- petites permeten concloure que existeix un perfil de velocitats ordenat i tangent a la superfície. Això permet deduir que aquesta zona es tracta de la capa límit laminar.

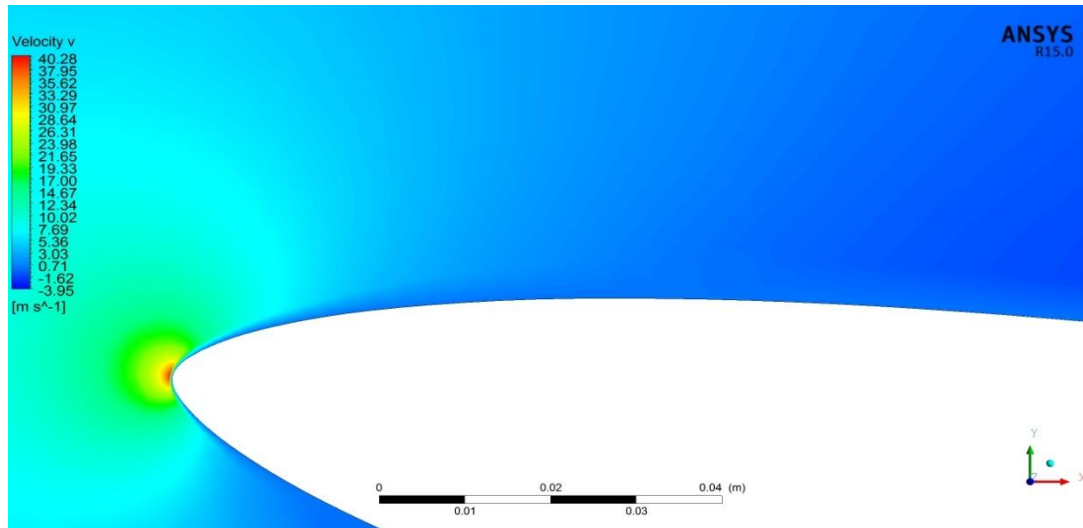


Fig. 5.9 Distribució de la component vertical de la velocitat

### 5.4.3. Anàlisi de les pressions

Per altra banda s'analitza les pressions que actuen sobre el perfil.

El valor de la pressió absoluta ( $P_{\text{ABS}}$ ) es compon de diferents tipus de pressions com es pot observar a l'equació 5.1

$$P_{\text{ABS}} = P_{\text{ATM}} + P_{\text{REL}} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

On  $P_{\text{ATM}}$  és la pressió atmosfèrica i  $P_{\text{REL}}$  és la pressió relativa.

Tan mateix la pressió relativa es divideix en dos pressions:

- Pressió estàtica - $P_s$ -
- Pressió dinàmica - $P_D$ -

Representat en l'equació 5.2:

$$P_{REL} = P_D + P_S \quad (\text{Eq.5.2})$$

La pressió estàtica és la pressió que exerceix el fluid sobre un pla paral·lel a la direcció del corrent, degut al xoc de les molècules com a conseqüència d'un moviment aleatori. En el nostre cas aquesta inclou la pressió hidrostàtica (Eq. 5.3), que és la pressió que exerceix el fluid a una profunditat  $-h$  de 1,5m

$$P_{Hid.} = \rho \cdot g \cdot h = 15100 \text{ Pa} \quad (\text{Eq.5.3})$$

Per altra banda la pressió dinàmica (Eq. 5.4) és la pressió que exerceix el fluid sobre un cos degut a la velocitat d'aquest.

$$P_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (\text{Eq. 5.4})$$

### Pressió estàtica:

A continuació en la Fig. 5.10 es representa un diagrama de pressions estàtiques al voltant del perfil.

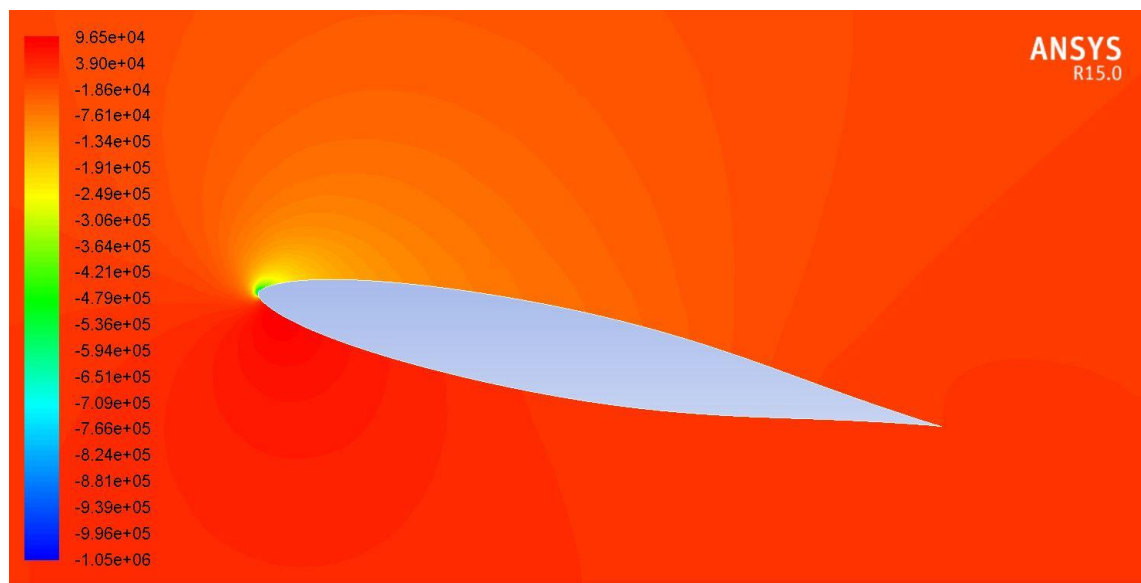


Fig. 5.10 Diagrama de la distribució de la pressió estàtica

A la Fig 5.11 s'ha realitzat un zoom per apreciar amb més precisió l'efecte de la pressió estàtica sobre el perfil.

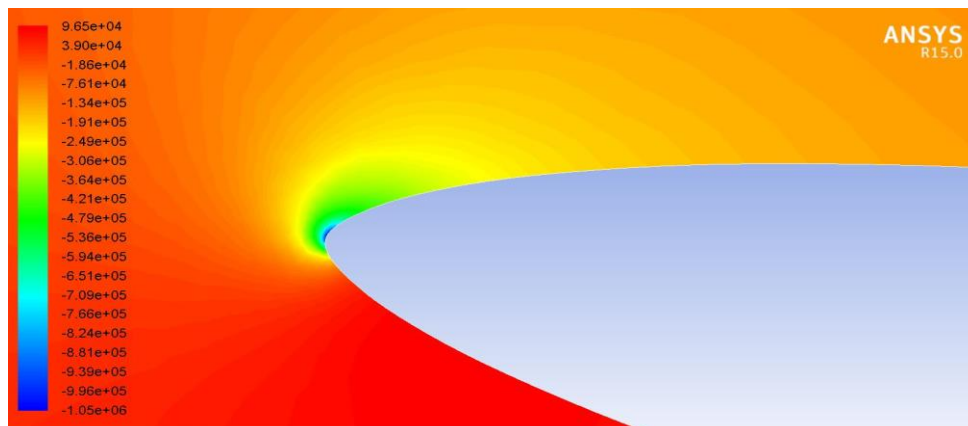


Fig. 5.11 Distribució de la pressió estàtica en el caire d'atac

Es pot observar com la pressió estàtica és mínima en el punt on la velocitat és màxima i com la pressió estàtica és màxima en el punt d'estancament.

$$P_{S.M\grave{A}X} = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

$$P_{S.M\grave{I}N} = -1,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



**Pressió dinàmica:**

A continuació en la Fig. 5.12 es representa un diagrama de pressió dinàmica al voltant del perfil.



Fig. 5. 12 Diagrama de la distribució de la pressió dinàmica

A la Fig. 5.13 s'ha realitzat un zoom per apreciar amb més precisió l'efecte de la pressió dinàmica sobre el perfil.

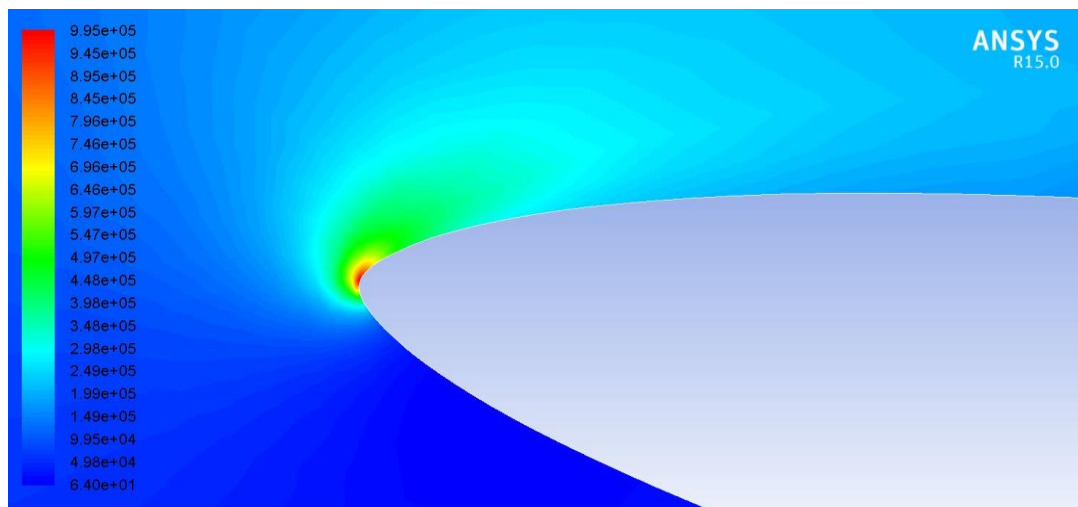


Fig. 5.13 Distribució de la pressió dinàmica en el caire d'atac

Coherentment s'observa l'efecte contrari en les pressions dinàmiques, on aquesta és màxim en el punt de velocitat màxima i mínima en el punt d'estancament.

$$P_{D.M\grave{A}X} = 9,95 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{D.MIN} = 6,4 \cdot 10^1 \text{ Pa} \approx 0 \text{ Pa}$$

El valor de la pressió dinàmica mínima és de 64 Pa el qual podem assumir com una pressió nul·la ja que en aquest punt teòricament la velocitat del fluid és nul·la.

D'acord amb l'equació de Bernoulli (Eq. 4.6) quan s'incrementa la velocitat, es produeix un augment de la pressió dinàmica, el que implica com s'ha vist una disminució de la pressió estàtica. Com s'observa en els diagrames, la pressió estàtica a l'extradós i a l'intradós poden ser menors que l'atmosfèrica i encara generar sustentació. El que realment afavoreix la sustentació és la distribució de la pressió relativa al llarg el perfil.

Els valors que s'obtenen de pressió relativa són:

$$P_{REL.Umin} = P_{S.MÀX} + P_{D.MIN} = 9.65 \cdot 10^4 + 64 = 96564 \text{ Pa}$$

$$P_{REL.Umàx} = P_{S.MIN} + P_{D.MÀX} = -1,05 \cdot 10^6 + 9,95 \cdot 10^5 = -5,5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

#### 5.4.4. Estudi de la cavitació

Un cop analitzats els diagrames de pressions, cal observar si els valors de pressions obtinguts estan dins dels rangs que no permeten l'aparició de cavitació. Com ja s'ha explicat en l'apartat (4.3.5) per tal de que no apareixi-hi cavitació en la superfície del *hydrofoil* cal que la pressió absoluta estigui per sobre de la pressió del vapor.

La pressió de vapor de l'aigua salada a 15°C és de  $P_{VAP}=1720.5 \text{ Pa}$  [6]. Si la pressió absoluta en algun punt del fluid ateny o està per sota del valor de la pressió de vapor apareix el fenomen de cavitació.

Per tal de veure si es produeix el fenomen de cavitació, es mira si la pressió absoluta mínima està per sota de la pressió de vapor. El punt amb pressió absoluta mínima que trobarem al voltant del perfil coincideix amb el punt on la pressió relativa és més petita.

$$P_{ABS.min} = P_{REL.Umàx} + P_{ATM} = -5,5 \cdot 10^4 + 101325 = 46325 \text{ Pa}$$

Es remarca que la  $P_{ABS}$  mínima està per sobre del valor de la pressió de vapor  $P_{VAP}$  per tant es pot assegurar, essent aquest el punt més crític, que no apareixerà cavitació al voltant del perfil E836 en aquestes condicions del fluid.

### 5.4.5. Anàlisi de la turbulència

També s'ha estudiat la turbulència del perfil com es pot observar en la Fig. 5.14

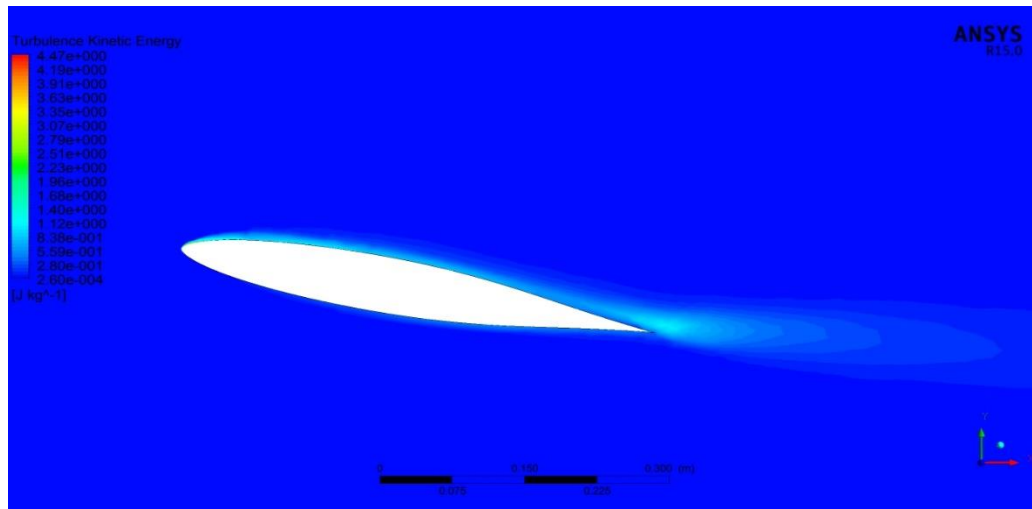


Fig. 5.14 Diagrama de turbulència

En la Fig. 5.15 es veu com existeix una turbulència controlada al voltant del perfil, des de pràcticament el caire d'entrada. Aquesta turbulència representa el comportament de la capa límit turbulenta.

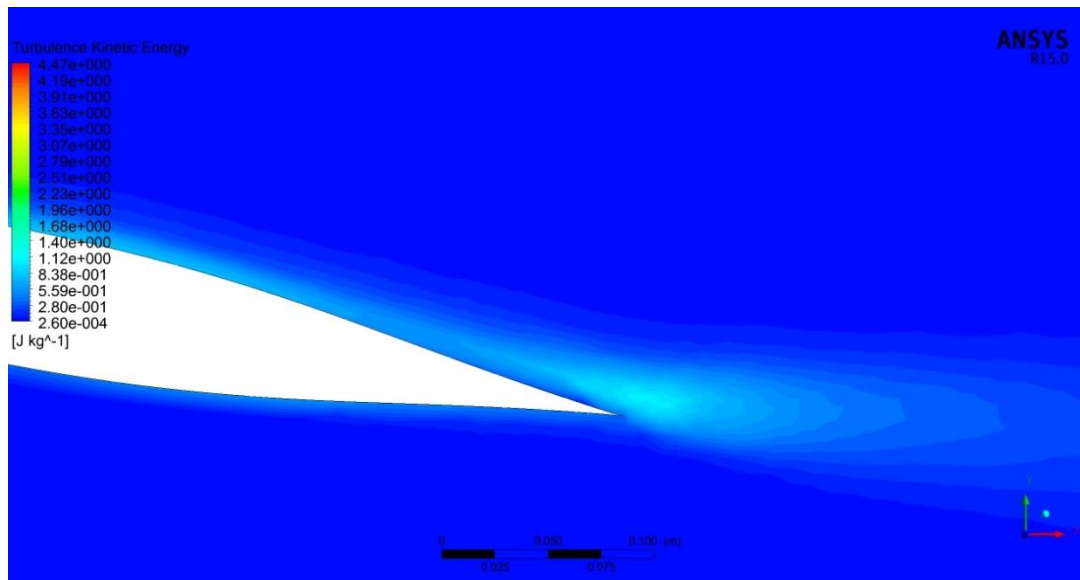


Fig. 5.15 Diagrama de turbulència en el caire de sortida

Per una altra part s'aprecia en el caire de sortida que la turbulència que genera aquest perfil augmenta, això és degut a la separació de la capa límit provocada per un gradient de pressions advers (Ap. 4.3.2).

## 5.5. Disseny i anàlisi del 3D

Per completar el model 3D ha sigut necessari incorporar dos elements més al perfil sustentador:

- Tija del *hydrofoil*
- Punta del *hydrofoil*

### 5.5.1. Tija del *hydrofoil*

Aquest component del *hydrofoil* no ha de proporcionar sustentació a l'*hydrofoil*, i per tal de no empitjorar el rendiment s'ha hagut de trobar un perfil amb un coeficient de resistència a l'avanç el més petit possible.

El perfil escollit ha de ser un perfil simètric per tal de no generar sustentació, d'aquesta manera no generarà forces laterals en l'estructura i per conseqüent la base sustentadora dimensionada es mantindrà horitzontal. Dins de les famílies de perfils simètrics, els més emprats en aquestes sol·licitacions són els perfils NACA.

Com primer paràmetre de selecció del perfil s'ha escollit un perfil NACA amb un gruix, "thickness", el més semblant al perfil de la part sustentadora. En aquest cas el perfil E836 té un gruix del 12,35% per tant s'escollirà un perfil NACA el més proper al 12%. És a dir es seleccionarà un perfil NACA de la categoria NACA xx-xx-12. Per altra banda busquem que el perfil sigui simètric per el que ens interessa que aquest tingui un valor de curvatura màxima, "camber" del 0%. Per tant s'escollirà un perfil del tipus NACA xx-00-12.

Un cop acotat la família de perfil a escollir s'ha realitzat un estudi comparatiu dels diferents perfils, per tal de trobar el més adient.

Com podem observar en la Fig. 5.16 els perfils seleccionats tenen una relació  $C_L$ - $C_D$  amb un comportament similar.

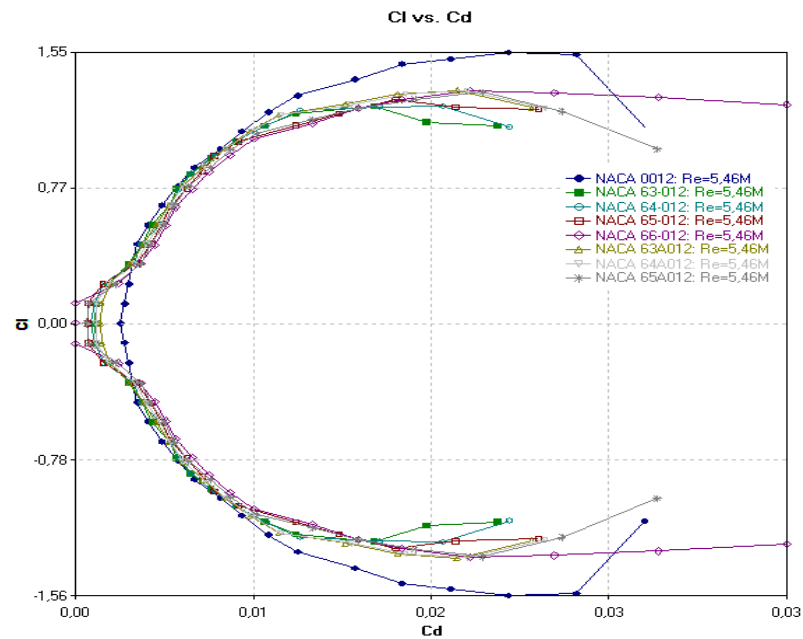


Fig. 5.16 Gràfic comparatiu de coeficient de sustentació en funció del coeficient de resistència a l'avanç

En aquest cas com el perfil és simètric i es busca que aquest estigui orientat amb un angle d'atac de  $0^\circ$  per tal de no obtenir sustentació, s'observa només els valors de resistència a l'avanç per valors de  $C_L$  nuls (Fig. 5.17)

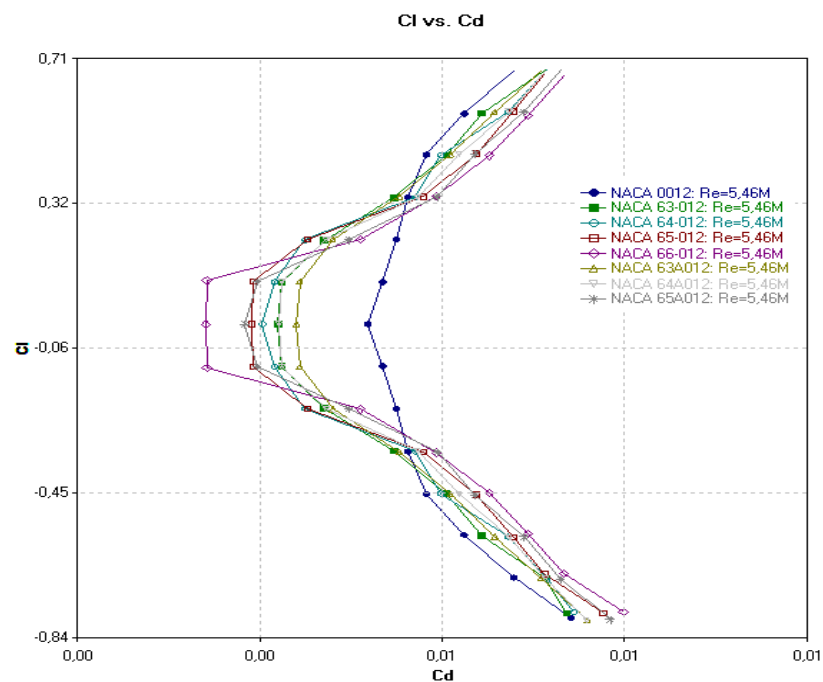


Fig. 5.17 Gràfic comparatiu de coeficient de sustentació en funció del coeficient de resistència a l'avanç

Com es pot observar en la Fig. 5.17 veiem que el perfil que ofereix menys resistència a l'avanç és el NACA 66-00-12

Degut a que aquest perfil no genera sustentació, s'ha decidit no incloure aquesta part del *hydrofoil* en la simulació del estudi 3D. La raó per la qual s'ha descartat del estudi és la simplificació del procés iteratiu de la simulació. Degut a les grans dimensions de la "tija" aquesta dificulta i alenteix el procés de simulació per elements finits.

### 5.5.2. Punta del *hydrofoil*

Com ja s'ha comentat en el apartat 4.3.6 es genera una resistència a l'avanç induïda a la punta del *hydrofoil*. És per això, que s'ha dissenyat una punta de manera que l'efecte d'aquest fenomen afecti lo menys possible al rendiment del *hydrofoil*.

S'ha realitzat un disseny (tenint en compte els models que s'utilitzen actualment en competició) de manera que el perfil vagi disminuint progressivament el seu gruix i la seva corda proporcionalment. D'aquesta manera obtenim el resultat que pot apreciar a la Fig. 5.18.

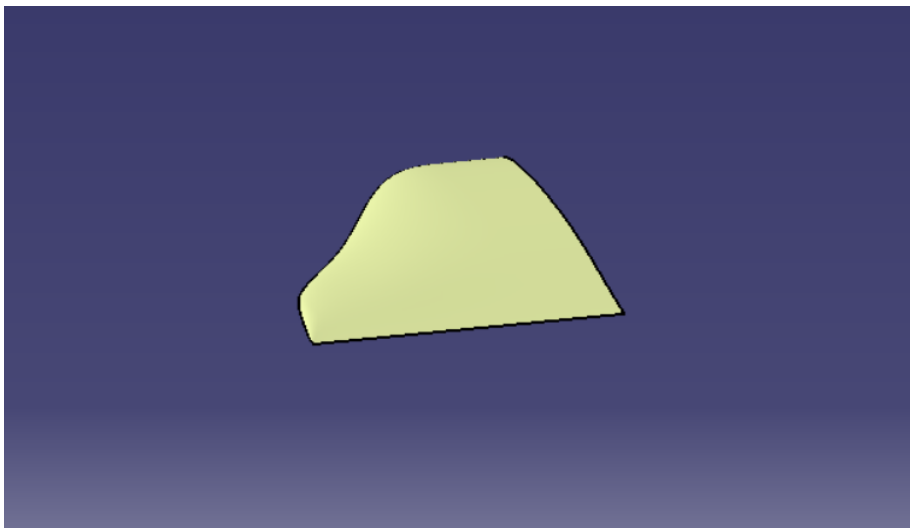


Fig. 5.18 Superfície de la punta del *hydrofoil*

### 5.5.2.1. Simulació 3D

S'ha dissenyat un volum de control al voltant de la superfície per tal d'estudiar l'element mitjançant el programa de simulació FLUENT. El volum de control dissenyat es pot observar en la figura 5.19.

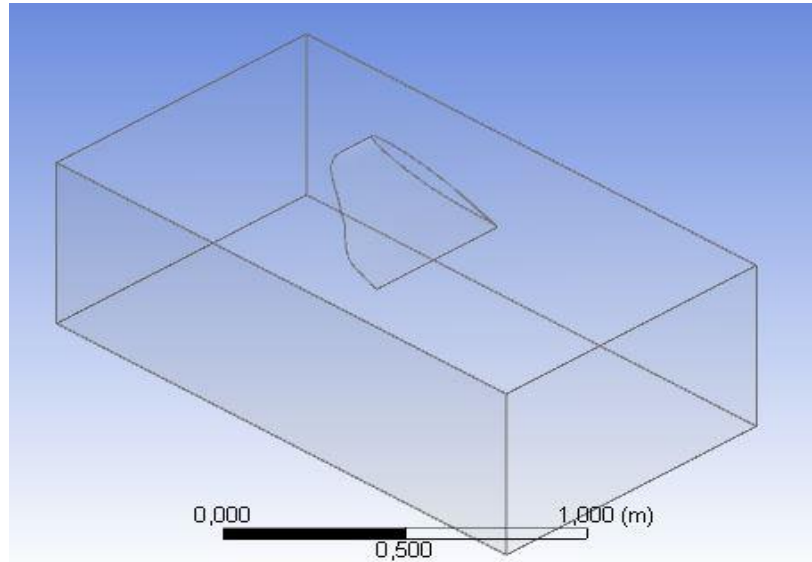


Fig. 5.19 Volum de control de la punta del *hydrofoil*

Una vegada definit el volum de control es realitza una malla lo més precisa i adequada per el conjunt. El resultat de la malla obtingut és el següent (Fig. 5.20):

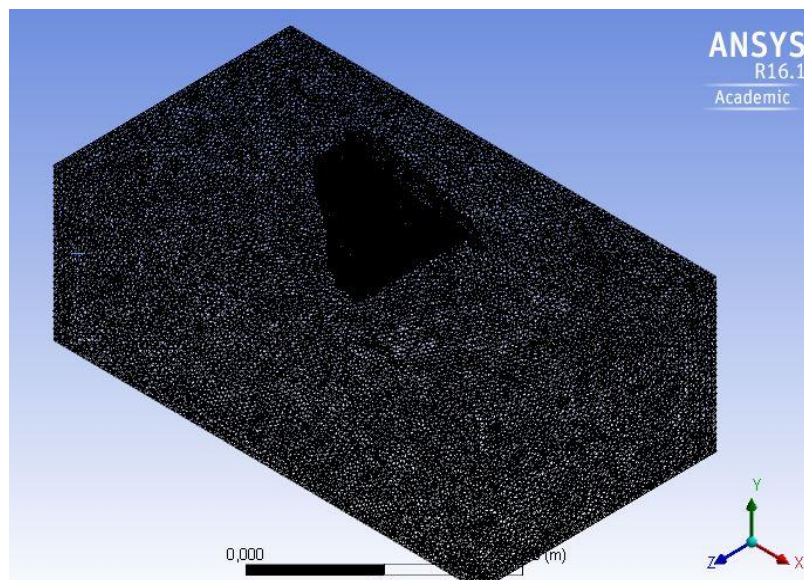


Fig. 5.20 Malla del volum de control de la punta del *hydrofoil*



S'han introduït les condicions del volum exactament igual que s'han aplicat a la superfície en el apartat 5.3 i s'obtenen els resultats de la punta del *hydrofoil*.

Es pot veure de manera més detallada com s'ha realitzat la simulació a l'annex C.

### 5.5.2.2. Resultats de la simulació 3D

Aquesta component del *hydrofoil* no genera una sustentació molt elevada degut a que el perfil va disminuint a mesura que ens apropem a la punta.

És per això que s'ha enfocat l'estudi d'aquest element al tipus de corrent que genera a la cua deixant de banda l'anàlisi de la sustentació que genera el conjunt perfil-punta.

En la Fig. 5.21 es pot observar (vist des de darrera) el vòrtex que es genera a la punta del perfil.

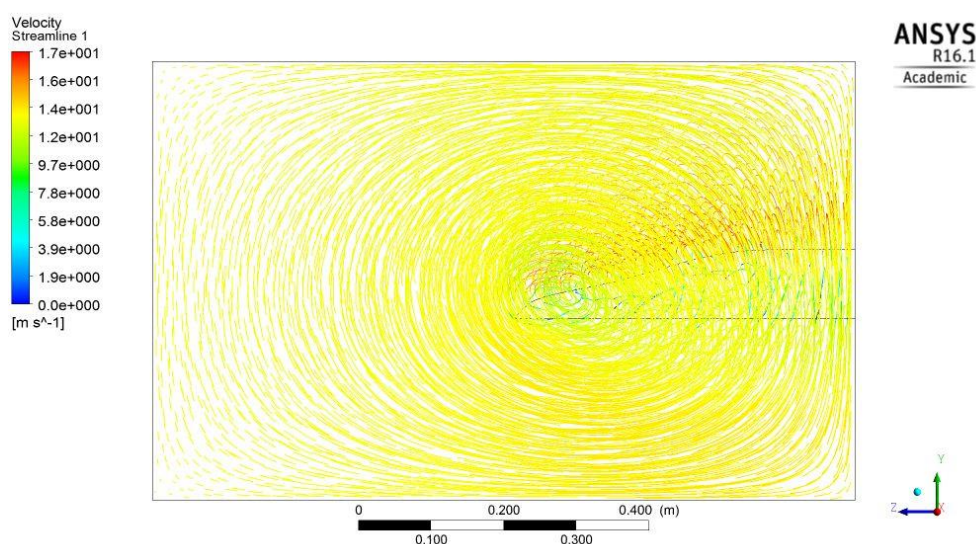


Fig. 5.21 Vista posterior de les línies de corrent en la punta del *hydrofoil*.



Es pot apreciar realitzant un zoom (Fig. 5.22) com s'obté un vòrtex en sentit horari. També es pot observar com el vòrtex es genera principalment al final del *hydrofoil*, però es comença a formar una vegada s'inicia la reducció del perfil.

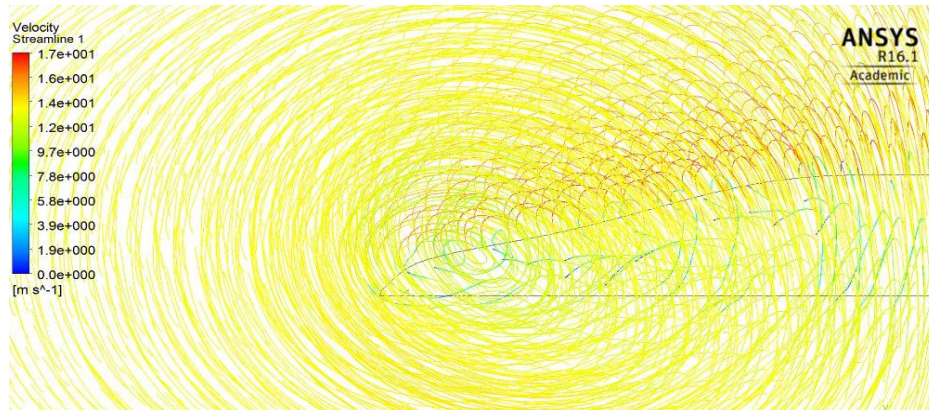


Fig. 5.22 Zoom de la vista posterior de les línies de corrent a la punta del *hydrofoil*.

A continuació s'ha realitzat una sèrie de seccions en el volum de contorn per tal de veure l'evolució del vòrtex a mesura que les línies de corrent avancen. En primer lloc es realitza una secció al caire d'atac ( $x = 0$  m), s'observa a la Fig 4.23 com les línies de corrent semblen orientar-se cap al vòrtex però encara no s'ha format.

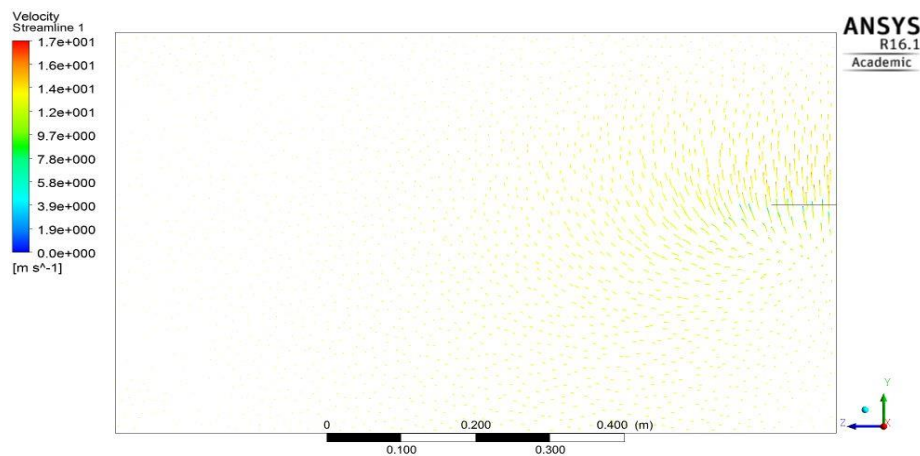


Fig. 5.23 Vista de la secció per  $x = 0$  m de les línies de corrent

Si situa una secció a la meitat de la corda del *hydrofoil* ( $x = 0,25$  m) s'observa com les línies de corrent comencen a formar un vòrtex però no gaire desplaçat cap la punta (Fig. 4.24).

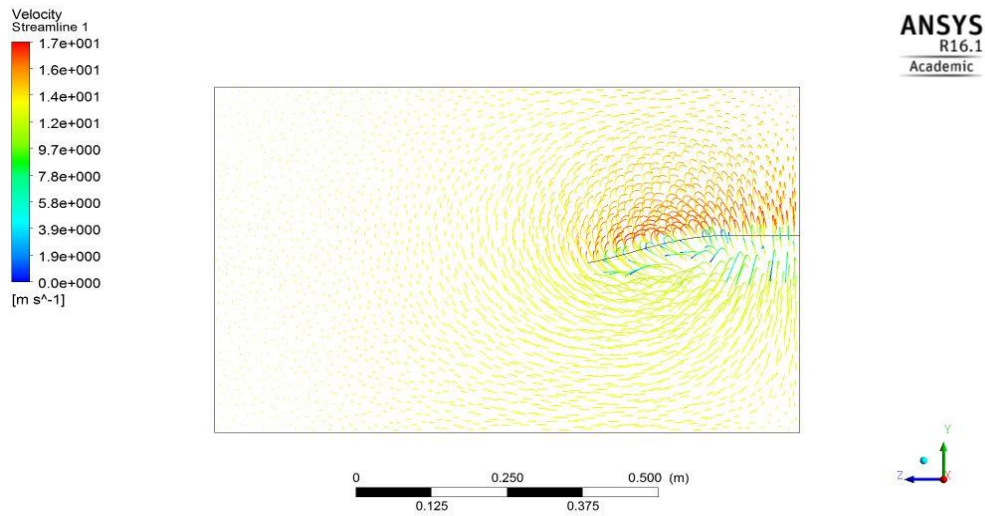


Fig. 5.24 Vista de la secció per  $x = 0,25$  m de les línies de corrent

Una vegada es veu des de al caire de sortida ( $x = 0,5$  m) s'observa en la figura 5.25 com el vòrtex ja s'ha orientat cap al final de la punta i que totes les línies de corrent estan lleugerament orientades en la direcció d'aquest.

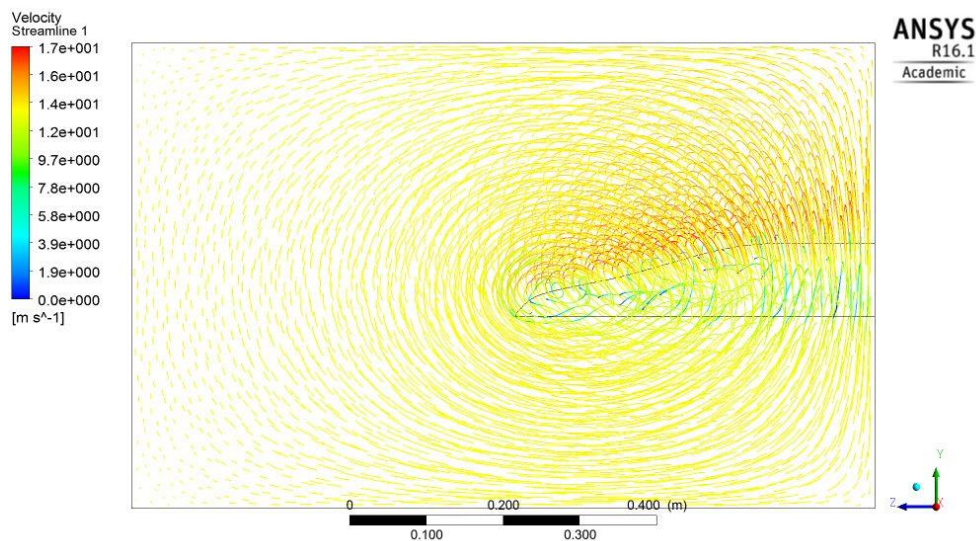


Fig. 5.25 Vista de la secció per  $x = 0,5$  m de les línies de corrent

Per últim s'observa en la figura 5.26 com el vòrtex a mesura que s'allunya del *hydrofoil* ( $x = 0,75$  m i  $x = 1$  m) no varia i es manté constant, si ens separéssim lo suficient es veuria com aquestes línies de corrent tornen a orientar-se en sentit normal a la secció

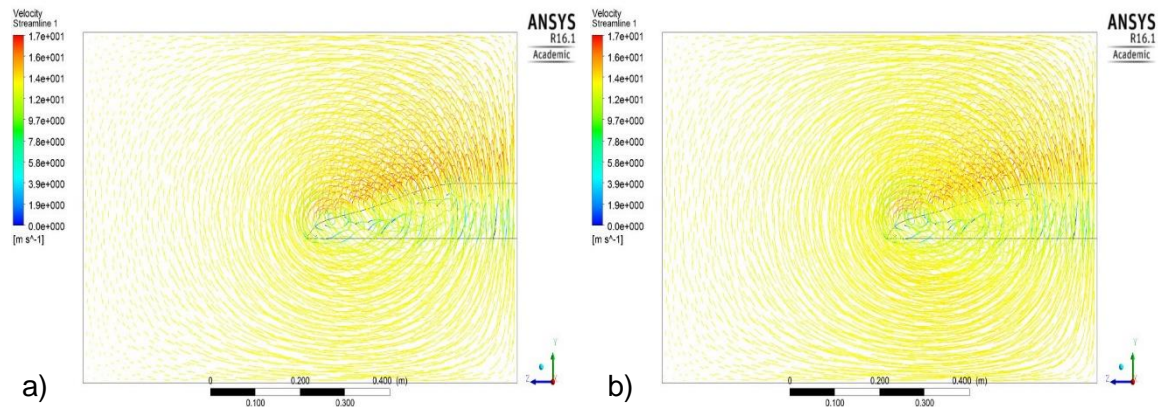


Fig. 5.26 a) Vista de la secció per  $x = 0,75$  m de les línies de corrent. b) Vista de la secció per  $x = 1$  m de les línies de corrent

### 5.5.3. Model en 3D



Fig. 5.27 Model en 3D del *hydrofoil* dissenyat

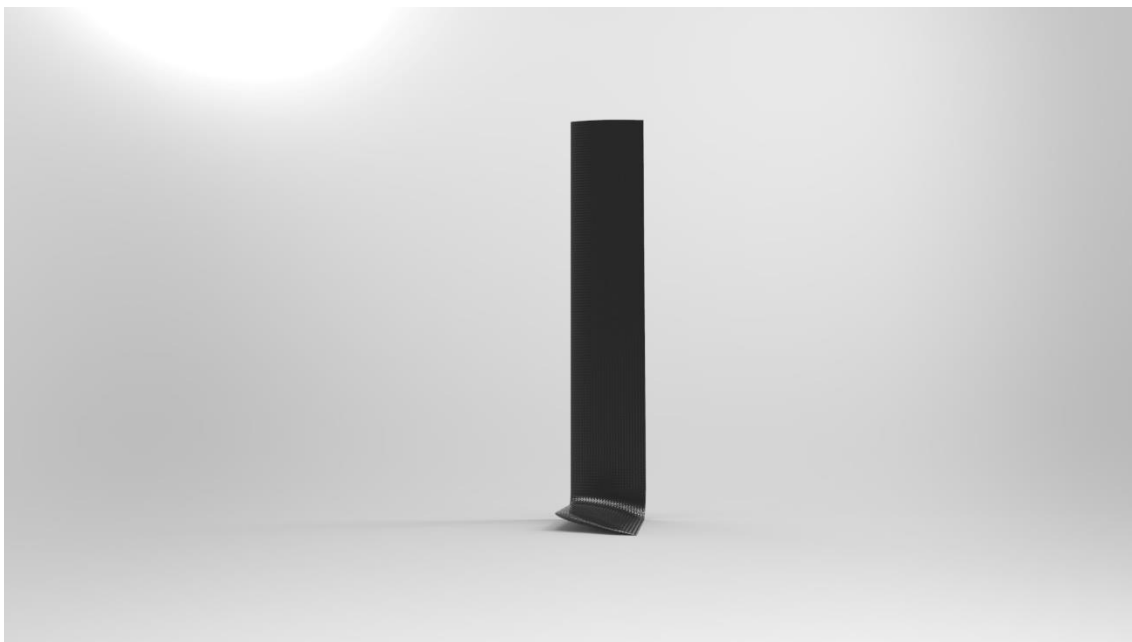


Fig. 5.28 Model en 3D del *hydrofoil* dissenyat



Fig. 5.29 Model en 3D del *hydrofoil* dissenyat



Fig. 5. 30 Model en 3D del *hydrofoil* dissenyat



## 6. Pressupost i planificació

El pressupost d'aquest projecte únicament inclou la fase d'estudi dels perfils i l'*hydrofoil* resultant.

El pressupost es realitza considerant un temps de desenvolupament de 6 mesos.

Els pressupostos es divideixen en:

- Pressupost del personal
- Pressupost dels serveis
- Pressupost del material

### 6.1. Pressupost de personal

Per el pressupost del personal es considera que el treball de totes les persones que han intervingut en el desenvolupament del estudi, es desglossa en la següent Taula 6.1:

Personal	Hores	Cost/Hora (€)	Total (€)
Enginyeria	300	20	6.000
Informàtic	25	20	500
Becari	250	8	2.000
Neteja	50	8	400
PRESSUPOST TOTAL DEL PERSONAL SENSE IVA			8.900
PRESSUPOST TOTAL DEL PERSONAL AMB IVA (21%)			10.769

Taula 6. 1. Pressupost del personal

## 6.2. Pressupost de serveis

El pressupost del servei engloba el consum d'aigua, electricitat, telèfon e internet. Es desglossa a la Taula 6.2:

<b>Servei</b>	<b>Total (€)</b>
<b>Aigua</b>	500
<b>Electricitat</b>	450
<b>Telèfon + Internet</b>	250
<b>PRESSUPOST TOTAL DE SERVEIS SENSE IVA</b>	<b>1.200</b>
<b>PRESSUPOST TOTAL DE SERVEIS AMB IVA (21%)</b>	<b>1.452</b>

Taula 6. 2. Pressupost de servei



### 6.3. Pressupost de material d'oficina

Dintre del pressupost del material d'oficina s'inclouen les llicències de software, es desglossa en la Taula 6.3:

Material		Total (€)	
Material paper ( fulls, carpetes...)		200	
Material informàtic (memòria USB)		150	
Tinta impressora		450	
PRESSUPOST TOTAL DEL MATERIAL SENSE IVA		800	
Llicència del Software	Unitats	Cost/Unitat (€)	Total (€)
Llicència Fluent	1	4.000	4.000
Llicència sistema operatiu	3	250	750
Llicència Office	3	300	900
Llicència VisualFoil 5.0	1	150	150
Llicència CATIA V5	1	1.500	1.500
COST TOTAL DE LES LLICÈNCIES SENSE IVA			7.300
AMORTITZACIÓ DEL MATERIAL D'OFICINA (ORDINADORS, TAULES, CADIRES, IMPRESORA, ETC..) SENSE IVA			1.500
PRESSUPOST TOTAL DE MATERIAL D'OFICINA AMB IVA (21%)			9801

Taula 6. 3. Pressupost de material

## 6.4. Pressupost total del projecte

El pressupost total per aquest projecte es mostra en la següent Taula 6.4:

<b>Pressupost total amb iva</b>	<b>Total (€)</b>
<b>PERSONAL</b>	10.769
<b>SERVEI</b>	1.452
<b>MATERIAL</b>	9.801
<b>BENEFICI ECONOMIC</b>	2.500
<b>PRESSUPOST TOTAL</b>	<b>24.522</b>

Taula 6.4 Pressupost total

A continuació a la Fig. 6.1 es mostra un diagrama de pastis on es pot veure els percentatges del pressupost total que representa el personal, el servei i el material.

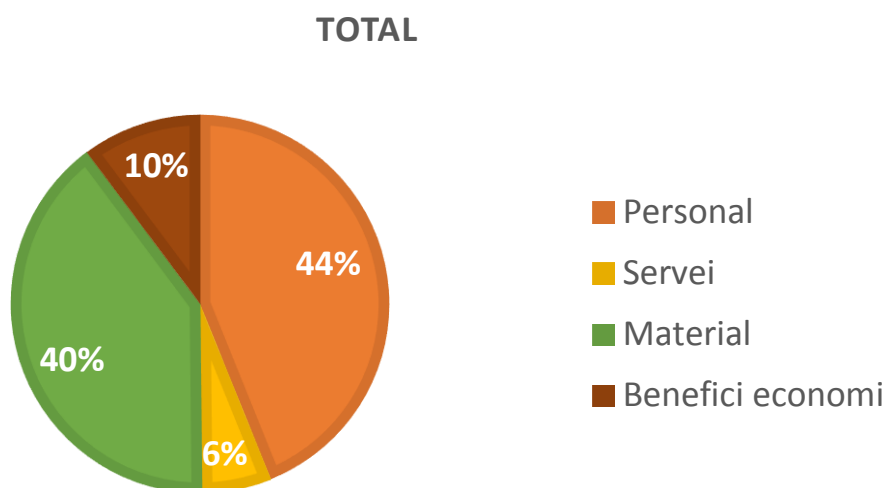


Fig. 6.1 Diagrama del pressupost total amb iva inclòs

## 6.5. Diagrama Gantt

Nombre	Duración	Inicio	Fin
☐PFC-HYDROFOIL	133d	06/04/2015	07/10/2015
☐RECERCA BIBLIOGRÀFICA	6.86s	06/04/2015	10/06/2015
Hydrofoil, característiques, història	3s	06/04/2015	04/05/2015
Perfils hidrodinàmics	2s	05/05/2015	22/05/2015
Criteris de selecció	2s	22/05/2015	10/06/2015
☐REDACCIÓ	101.97d	08/05/2015	28/09/2015
Redacció part teòrica	8.71s	08/05/2015	31/07/2015
Redacció part experimental	82d	01/06/2015	22/09/2015
Introducció, conclusions	3d	24/09/2015	28/09/2015
☐PART EXPERIMENTAL	84d	26/05/2015	18/09/2015
☐Selecció de perfil	35d	26/05/2015	13/07/2015
Simulació dels perfils	1s	26/05/2015	03/06/2015
Anàlisi simulacions	2s	04/06/2015	23/06/2015
Comparativa de perfils	1s	24/06/2015	02/07/2015
Assignació del perfil òptim a l'embarcació	1s	03/07/2015	13/07/2015
☐Estudi del 2D	28d	14/07/2015	20/08/2015
Disseny del perfil en CATIA V5	1s	14/07/2015	22/07/2015
Anàlisi del perfil en ANSYS 15.0	2s	23/07/2015	11/08/2015
Estudi dels resultats	1s	12/08/2015	20/08/2015
☐Estudi del 3D	21d	21/08/2015	18/09/2015
Disseny del perfil en CATIA V5	1s	21/08/2015	31/08/2015
Anàlisi del perfil en ANSYS 15.0	1s	01/09/2015	09/09/2015
Estudi dels resultats	1s	10/09/2015	18/09/2015
ENTREGA DEL PROJECTE	2d	06/10/2015	07/10/2015

Taula 6. 5 Desglossament de les diferents etapes del projecte

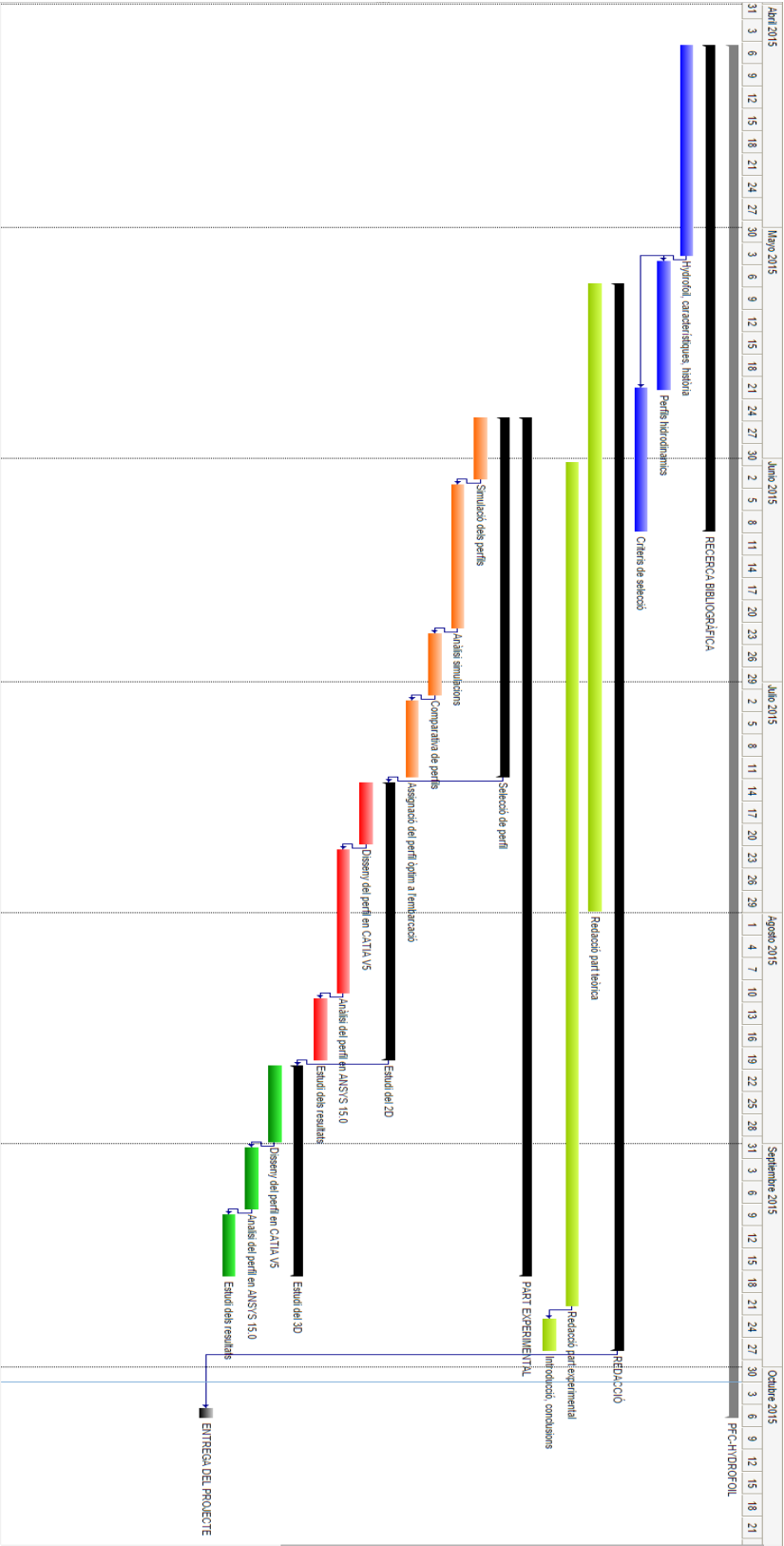


Fig. 6.2 Cronograma Gantt de les diferents etapes del projecte

## 7. Impacte medi-ambiental

Hi ha diversos aspectes mediambientals a comentar respecte aquest projecte.

El primer de tots fa referència a l'elecció del perfil. Com a objectiu del projecte es va establir aconseguir un perfil que sustentés una embarcació AC45. A l'hora de realitzar la selecció del perfil es va tindre en compte maximitzar el rendiment del perfil i no tant el coeficient de sustentació. Aquest fet és molt important per disminuir la força de propulsió necessària per avançar. Si l'embarcació s'impulsés amb un motor s'estalviaria combustible.

Pel cas d'una embarcació de vela, el cost de la propulsió mitjançant el vent pot semblar nul, però això pot provocar, en petita escala, la modificació del vent i les seves línies de corrent. Per tant pot afectar a aus o qualsevol objecte o estructura que depengui del vent.

Pel que fa el treball d'investigació i anàlisi s'ha de tenir en compte que el fet d'utilitzar el software VisuaFoil 5.0 ha permès realitzar un estudi dels perfils més ràpid. D'aquesta manera utilitzant aquesta eina de simulació ens hem estalviat moltes hores de treball de personal i de computació als ordinadors. Tanmateix l'ús del càlcul computacional per realitzar l'estudi fluidodinàmic a l'entorn del perfil, ha permès estalviar l'energia i els costos que genera alquilar un túnel de vent per realitzar les observacions.

Finalment, comentar que s'ha simulat tot considerant que el material emprat per realitzar aquest *hydrofoil* sigui fibra de carboni. Material molt emprat en la indústria naval en aplicacions molt tècniques. Aquest *composite* té característiques mecàniques i químiques idònies per les condicions de treball establertes. A continuació es mostra un petit estudi amb el programa CES EDUPACK que ens mostra quina és la despesa energètica generada per l'obtenció del *hydrofoil* en els processos de l'obtenció del material i el seu manufacturat. Per altra banda també s'ha calculat la quantitat de CO<sub>2</sub> produïda en els diferents processos.

En aquest procés d'examinar quins són els diferents residus obtinguts del procés de manufacturat hem estimat uns residus excedents del 5%. Aquests residus es componen bàsicament de resina d'epoxi curada amb fibres de carboni.

### Material:

[Energy and CO2 Summary](#)

Component	Material	Recycled content* (%)	Part mass (kg)	Qty.	Total mass processed** (kg)	Energy (MJ)	%
<b>Hydrofoil</b>	Epoxy SMC (carbon fiber)	Virgin (0%)	60	2	1.3e+02	4.8e+04	100.0
Total				2	1.3e+02	4.8e+04	100

Fig. 7.1. Despesa energètica de l'obtenció de la fibra de carboni

**Manufacture:**[Energy and CO2 Summary](#)

Component	Process	% Removed	Amount processed	Energy (MJ)	%
<b>Hydrofoil</b>	Compression molding	-	1.3e+02 kg	4.4e+02	99.6
<b>Hydrofoil</b>	Cutting and trimming	5	6.3 kg	1.9	0.4
Total				<b>4.4e+02</b>	<b>100</b>

Fig. 7.2.Despesa energètica del manufacturat del *hydrofoil* amb fibra de carboni

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 (kg)	CO2 (%)
<b>Material</b>	4.76e+04	99.0	3.12e+03	98.8
<b>Manufacture</b>	444	0.9	35.5	1.1

Fig. 7.3.Despesa energètica i generació de CO2 dels diferents processos de fabricació

## 8. CONCLUSIONS

A continuació es comenten els objectius i les conclusions associades a cadascun d'ells.

Aprofundir en el coneixement dels *hydrofoils* i els diferents tipus existents segons el tipus de navegació desitjada.

- S'han assolit coneixements elevats dels *hydrofoils* i dels diferents tipus existents que ens ha permès desenvolupar un projecte extens sobre ells.

Prendre coneixement sobre quins són els paràmetres i dades analítiques que permeten una selecció del perfil amb més eficiència per les especificacions requerides.

- S'ha aprofundit sobre els factors més rellevants i importants per a la sustentació del perfil. Fet que ha permès realitzar una correcta selecció del perfil.

Aprendre a realitzar analítiques fluidodinàmiques en 2D gràcies al software VisualFoil 5.0.

Trobar, dintre de la base de Dades Internacional de perfils d'ala (UIUC Airfoil Data Site), el perfil d'ala més eficient per la navegació d'un catamarà AC45.

Realitzar un estudi analític mitjançant un software de simulació fluidodinàmica computacional i saber gestionar, comparar i avaluar la informació obtinguda.

- S'ha arribat fins a un enteniment que ha permès poder avaluar quins són els factors i criteris més importants en la selecció d'un perfil tenint en compte les diferents condicions de contorn i objectius desitjats.
- S'ha obtingut un alt nivell de control del software VisualFoil 5.0. S'ha realitzat un estudi exhaustiu dels diferents perfils que es troben dintre de la base de dades internacional de perfils d'ala, s'han comparat i analitzat els resultats obtinguts. El resultat del estudi ha sigut la selecció del perfil Eppler 836.

Realitzar un disseny 2D i 3D amb alta eficiència hidrodinàmica i amb capacitat sustentadora per enlairar una embarcació AC45.

- S'ha realitzat un disseny 2D del perfil hidrodinàmic i s'han obtingut resultats concloents que reafirmen l'elecció del perfil hidrodinàmic escollit.
- S'ha assolit un alt nivell de simulació computacional amb el Ansys 15.0 i destresa a l'hora de simplificar les simulacions.
- S'ha dissenyat el 3D i s'ha simulat la punta del *hydrofoil*. Els resultats obtinguts mostren el comportament del fluid al voltant del *hydrofoil*.

**BIBLIOGRAFIA:****Referències bibliogràfiques**

- [1] JOHN D. ANDERSON Jr. "Fundamentals of aerodynamic" Second Edition. New York:: McGraw-Hill, 2011.
- [2] RAY WHITFORD. "Design for air combat". United Kingdom, Jane's Publishing Company Limited, 1987.
- [3] M. RODRÍGUEZ i R. MARTÍNEZ-VAL. "Capa límite". Ingeniería Aeronáutica i Astronáutica, No 328. Julio 1992.
- [4] FERNÁNDEZ ROQUE TIBURCIO, CORREA ARREDONDO JOSÉ ARTURO, MEJÍA CARMONA ALEJANDRO. "Determinación semi-empírica del centro aerodinámico de un perfil de ala". Mexico DF, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica i Eléctrica Unidad Ticomán., 2012.
- [5] PHILLIP EISENBERG. "Cavitation and impact erosion: concepts, correlations, controversies" University of California, Hydronautics, Incorporated, 1967.
- [6] Massachusetts Institute of Technology "Thermophysical properties of seawater". Disponible a: [http://web.mit.edu/seawater/Seawater\\_Property\\_Tables.pdf](http://web.mit.edu/seawater/Seawater_Property_Tables.pdf) [Visitat el 12/6/2015].

**Bibliografia complementaria**

R. Eppler, Airfoil design and data. Berlin :: Springer-Verlag, 1990.

"UIUC Airfoil Data Site.". Disponible a: [http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html). [Visitat el: 17/05/2015].

"VisualFoil 5.0"

"ANSYS Help 15.0"



**AGRAÏMENTS:**

En primer lloc ens agradaria donar les gràcies a l'Enric Trillas per donar-nos l'oportunitat de realitzar un projecte d'aquesta magnitud conjuntament, a més a més de tot el suport i coneixements aportats durant el desenvolupament del projecte.

En segon lloc agrair a la Carme Valero i el David Valentín pels consells i l'ajuda aportada en el camp de la simulació.

També agrair l'ajuda dels companys d'universitat que ens han donat un cop de mà durant el projecte i en especial l'Albert Puiggalí.

I finalment agrair a les nostres famílies i amics per el suport rebut durant tota la carrera.

Gràcies a tots.